



HAL
open science

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

Valérie Bert, Anissa LOUNES - HADJ SAHRAOUI, Corinne Leyval, Joël Fontaine, Stéphanie Ouvrard

► To cite this version:

Valérie Bert, Anissa LOUNES - HADJ SAHRAOUI, Corinne Leyval, Joël Fontaine, Stéphanie Ouvrard. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Bert, Valérie. EDP Sciences; Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME); Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS), 86 p., 2012, 978-2-7598-0805-2. hal-04760822

HAL Id: hal-04760822

<https://hal.science/hal-04760822v1>

Submitted on 30 Oct 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



ADEME

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

État de l'art et guide de mise en œuvre

Coordonné par Valérie Bert

Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

**ÉTAT DE L'ART
ET GUIDE DE MISE EN ŒUVRE**

Valérie Bert – Anissa Hadj-Sahraoui – Corinne Leyval
Joël Fontaine – Stéphanie Ouvrard



Imprimé en France
ISBN : 978-2-7598-0805-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2012



Sommaire

| | |
|---|-----|
| Les auteurs | V |
| Table des figures | VII |
| Table des tableaux | IX |
| Abréviations utilisées | XI |
| Avant-propos | 1 |
| Chapitre 1 Présentation générale | 3 |
| 1.1 Contexte..... | 3 |
| 1.2 Applications en France et à l'International | 4 |
| 1.3 Enjeux | 7 |
| Chapitre 2 Applicabilité | 9 |
| 2.1 Compétences nécessaires..... | 9 |
| 2.2 Caractérisation du site et paramètres clefs | 10 |
| 2.3 Protocole de mise en place et d'entretien..... | 11 |
| 2.4 Avantages et limites des phytotechnologies..... | 12 |
| 2.5 Évaluation de la performance..... | 13 |

| | |
|---|----|
| 2.6 Questions/réponses | 14 |
| 2.7 Arbre de décision | 16 |
| 2.8 Aspects règlementaires | 18 |
| Chapitre 3 Phytostabilisation | 23 |
| 3.1 Descriptif technique | 23 |
| 3.2 Préconisations | 25 |
| 3.3 Applications..... | 34 |
| 3.4 Questions/réponses | 40 |
| Chapitre 4 Phytoextraction | 43 |
| 4.1 Descriptif technique | 43 |
| 4.2 Préconisations | 45 |
| 4.3 Applications..... | 54 |
| 4.4 Questions/réponses | 59 |
| Chapitre 5 Phyto et rhizodégradation | 61 |
| 5.1 Descriptif technique | 61 |
| 5.2 Préconisations | 63 |
| 5.3 Applications..... | 68 |
| 5.4 Questions/réponses | 71 |
| Références | 73 |
| Glossaire | 85 |

- Tous les mots avec une astérisque * sont définis dans le glossaire.
- Les références complètes correspondant à celles mentionnées dans le texte (dans les encarts *En savoir plus*) sont répertoriées dans la partie Références.



Les auteurs

- Pour les parties générales et les parties sur la phytostabilisation et la phytoextraction :
Valérie BERT – *INERIS*
- Pour la partie sur la phyto/rhizodégradation :
Anissa HADJ-SAHRAOUI – *ULCO/UCEIV*
Corinne LEYVAL – *LIMOS*
Joël FONTAINE – *ULCO/UCEIV*
Stéphanie OUVRARD – *Université de Lorraine/INRA*
- La coordination technique pour la réalisation et la relecture de ce guide a été assurée par
Amandine UHMANN – *ADEME*
- Les personnes suivantes ont participé à la conception de ce guide :
Pour l'INERIS : Martine RAMEL et Rodolphe GAUCHER
Pour l'ADEME : Nadine DUESO et Frédérique CADIERE

- Les auteurs et les concepteurs de ce guide expriment leur reconnaissance aux personnes qui ont fait partie du comité de relecture :

Cécile GRAND – *ADEME*

Yves DUCLOS – *ADEME*

Francis DOUAY – *ISA*

Claude GRISON – *CEFE Montpellier*

Olivier FAURE – *EMSE*

Guillaume ECHEVARRIA – *Université de Lorraine/INRA*

Michel CHALOT – *UFC*

Jean-Louis MOREL – *Université de Lorraine/INRA*

Michel MENCH – *INRA Bordeaux*

Ce guide est édité par l'ADEME pour le compte de l'ADEME et de l'INERIS.



Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 2.1 : Principales étapes de la mise en œuvre d'une phytotechnologie..... | 11 |
| Figure 2.2 : Arbre de décision..... | 17 |
| Figure 3.1 : Schéma de fonctionnement de la phytostabilisation..... | 24 |
| Figure 3.2 : Peuplier (photo du projet BIOFILTREE, Valérie Bert) | 25 |
| Figure 3.3 : Miscanthus (photo du projet PHYTENER) | 26 |
| Figure 3.4 : Description des trois exemples de situation de phytostabilisation (état initial / état d'arrivée) | 31 |
| Figure 3.5 : Protocole de mise en œuvre d'une phytostabilisation et d'une phytostabilisation aidée | 32 |
| Figure 4.1 : Schéma de fonctionnement de la phytoextraction..... | 44 |
| Figure 4.2 : <i>Noccea caerulea</i> (photo de Thibault Sterckeman) | 46 |
| Figure 4.3 : <i>Alyssum murale</i> (photo de Guillaume Echevaria) | 46 |
| Figure 4.4 : Protocole de mise en œuvre d'une phytoextraction (avec amendement ou non) | 52 |
| Figure 5.1 : Schéma de fonctionnement de la phyto et rhizodégradation | 62 |
| Figure 5.2 : Protocole de mise en œuvre d'une phyto et rhizodégradation..... | 67 |

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' q p c m (' i g h v ' d i e p m



Table des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1 : Essais français de phytotechnologies en plein champ | 6 |
| Tableau 3.1 : Association des filières de valorisation et des espèces de plantes utilisées pour la phytostabilisation | 27 |
| Tableau 3.2 : Association des polluants avec des amendements (préconisés ou à éviter) ... | 29 |
| Tableau 3.3 : Exemples de coûts de mise en œuvre de phytostabilisation (sur une surface d'un hectare) | 31 |
| Tableau 4.1 : Association des polluants avec des plantes pour la phytoextraction et leurs valorisations potentielles..... | 47 |
| Tableau 4.2 : Exemple de coûts pour la mise en œuvre d'une phytoextraction (sur une surface d'un hectare)..... | 51 |
| Tableau 5.1 : Association des polluants avec les plantes pour la phyto et rhizodégradation..... | 64 |

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' q p c m (' i g h' d i e p m



Abréviations utilisées

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

PCB : PolyChloroBiphényles

BTEX : Benzène Toluène Ethylbenzène Xylènes

EDTA : acide éthylène diamine tétraacétique

DPTA : acide diéthylène triamine pentaacétique

NTA : acide nitrilotri-acétique

EDDS : acide éthylène-diamine-di-succinate

M : unité de la concentration molaire, équivalente à mol/l

TCR et TTCR : Taillis à Courte Rotation et Très Courte Rotation

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement ; services déconcentrés du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE)

UPDS : Union des Professionnels de la Dépollution des Sites

COST : European Cooperation in Science and Technology

SAFIR : Sites Ateliers Français pour l'Innovation et la Recherche sur la gestion des sols

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' q p c m (' i g h v' d i e p m



Avant-propos

Les phytotechnologies restent encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion et de dépollution des sols. Elles constituent pourtant, a priori, des solutions technico-financières particulièrement bien adaptées aux sites à vastes surfaces polluées. À des échelles plus petites, elles peuvent certainement constituer des alternatives douces aux objectifs de gestion dans des contextes où la durée du traitement n'est pas une contrainte.

Le recours aux phytotechnologies est souvent évoqué lors des opérations de réhabilitation de friches industrielles ou urbaines, mais trop rarement concrétisé par manque de recul opérationnel.

Pourtant, un certain nombre d'expérimentations sur l'ensemble du territoire, encouragées et soutenues par l'Ademe depuis plusieurs années, permettent aujourd'hui de présenter des retours d'expériences dans différentes situations de pollution et de donner une vision concrète des apports et des limites des différentes solutions appliquées sur le terrain.

Ce guide permet de faire le point sur l'état opérationnel des phytotechnologies en France. Il présente trois techniques, la phytostabilisation, la phytoextraction et la phyto/rhizodégradation sous les aspects techniques, économiques et opérationnels. Il est à destination de tout maître d'ouvrage ou bureau d'étude qui souhaiterait utiliser ces phytotechnologies.

Martine RAMEL,
Responsable du Pôle Risques et technologies durables,
INERIS

et

Nadine DUESO,
Chef de Service Adjointe du Service Friches Urbaines et Sites Pollués,
ADEME



Présentation générale

1.1 Contexte

En France, l'héritage de plus de 200 ans d'activité industrielle a fait de la gestion des sols pollués un enjeu d'autant plus important que les questions des impacts sur la santé sont aujourd'hui au centre des préoccupations sociétales. Deux phénomènes socio-économiques se combinent pour rendre prioritaire la valorisation des sites pollués. Les évolutions structurelles du secteur industriel conduisent à l'arrêt de nombreuses exploitations et à l'augmentation du nombre de friches industrielles. Par ailleurs, les pressions démographique et foncière en zones urbanisées incitent à envisager de reconvertir ces friches pour d'autres utilisations.

1.1.1 *La gestion des sites pollués, priorité du Grenelle de l'Environnement*

La pollution des sols par les activités industrielles, reconnue comme une question environnementale depuis les années quatre-vingt dix, fait l'objet d'une politique de gestion qui s'est d'abord attachée à recenser et hiérarchiser les sites pollués en fonction de leur niveau de pollution intrinsèque, potentiel ou avéré. L'approche actuelle de la gestion a évolué pour s'appuyer

sur une évaluation des risques en fonction de l'usage des sites. Elle met l'accent sur la compatibilité de l'état des milieux avec les usages constatés et futurs, avec la nécessité de rétablir cette compatibilité afin de maîtriser des impacts sur la santé et l'environnement (après réhabilitation des sites). Les sols pollués ont fait bien évidemment partie intégrante des préoccupations du Grenelle de l'Environnement traduit en dispositions dans la Loi Grenelle II : nécessité d'achever l'inventaire des sites pollués « historiques » afin d'établir les priorités d'action en fonction de la localisation (présence de points d'eau, de populations sensibles exposées...) ; besoin de renforcer les moyens dévolus à l'État pour réhabiliter les stations-service fermées et les sites pollués « orphelins ». Reprenant une proposition du Grenelle de l'Environnement, l'article 43 de la loi Grenelle II précise, concernant la réhabilitation des sites pollués, que « les techniques de dépollution par les plantes seront de préférence utilisées ».

1.1.2 Les phytotechnologies pour la gestion des sites pollués

Les phytotechnologies regroupent un ensemble de techniques qui utilisent des espèces végétales pour extraire, contenir ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques. Émergentes sur les marchés du traitement et de la gestion des sites et sols pollués, ces techniques douces peuvent s'appliquer *in situ* sur une large variété de sols pollués (sols agricoles, friches industrielles, sédiments excavés, etc.) en milieu rural et urbain. Jugées *a priori* plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques classiques de traitement sur site et hors site, elles impactent positivement les fonctions et la structure du sol. Ces techniques constituent une alternative ou un complément aux techniques conventionnelles dans le cas notamment de pollution à grande échelle.

1.2 Applications en France et à l'International

En bref :

- La **phytostabilisation** est une technique *in situ* de stabilisation basée sur l'utilisation des plantes. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion destiné à stabiliser les éléments traces du sol. Les plantes, éventuellement en combinaison avec des amendements (**phytostabilisation aidée**), réduisent la mobilité des polluants et donc les transferts horizontaux et verticaux de polluants.
- La **phytoextraction** est l'utilisation *in situ* de plantes qui en accumulant les éléments traces dans leurs parties aériennes récoltables, permettent de réduire les concentrations de polluant dans les sols, et ainsi contribuent à leur dépollution.
- La **phyto / rhizodégradation** est une technique *in situ* utilisant des plantes et des microorganismes pour dégrader des polluants organiques en constituants élémentaires (minéralisation).

Depuis les années quatre-vingt-dix, ces techniques font l'objet de multiples recherches menées par des équipes nationales et internationales. Les objectifs principaux de ces recherches sont orientés selon deux axes complémentaires : l'un, de nature plutôt fondamental, vise à

acquérir des connaissances sur les mécanismes de tolérance et d'accumulation des plantes candidates en phytotechnologies pour connaître, voire améliorer, leur capacité à tolérer, à immobiliser ou à extraire les polluants ; l'autre, plus appliqué, vise à mettre en œuvre et à optimiser les itinéraires techniques (du semis à la récolte) et les filières de valorisation de la biomasse collectée dans une approche intégrée de gestion durable des sols pollués. Depuis 1998, ces recherches ont été en particulier développées et valorisées au sein des réseaux européens de scientifiques formés dans le cadre des actions COST. Des expérimentations ont lieu notamment sur les sites ateliers du réseau SAFIR, mis en place afin de faciliter l'accès à des sites expérimentaux aux équipes de recherche ainsi que de mutualiser les connaissances et les retours d'expérience.

Des revues résument les connaissances acquises, au niveau physiologique, biochimique et moléculaire, sur les mécanismes d'absorption et d'exclusion des polluants et leur transfert des racines vers les parties aériennes, de stockage, de détoxification, etc. D'autres revues résument les connaissances acquises et le niveau d'application atteint par la phytostabilisation, la phytoextraction et la phyto- et rhizodégradation via la synthèse des travaux de recherche menés en parcelles, pilotes et plein champ.

Des travaux de recherche appliquée de grande envergure dont certains sont intégrés dans des projets d'aménagement sont en cours de réalisation au niveau français.

En France, le marché de la phytoremédiation est un marché naissant, comme le confirme le faible volume de terres traitées par phytoremédiation (selon l'étude Ernst & Young pour l'ADEME, 0,3 % des volumes de terres traitées en 2010).

En 2010, en Europe, une quarantaine d'essais de phytostabilisation et une quarantaine d'essais de phytoextraction étaient recensés par la communauté scientifique. Ces essais ont été conduits (ou le sont encore) principalement dans le cadre de projets de recherche sur des sols agricoles, des friches industrielles, des sites miniers et des sédiments excavés pollués par les éléments traces (cadmium, zinc, plomb, cuivre, nickel, arsenic, chrome, antimoine, thallium, bismuth), et en conditions réelles sur des surfaces variées, allant de quelques mètres carrés à quelques dizaines d'hectares. La France comptait une dizaine de sites phytostabilisés connus et deux sites où la phytoextraction était étudiée. Depuis 2011, le nombre de sites sur lesquels les phytotechnologies sont étudiés est en augmentation (tableau 1.1).

Peu de résultats issus de recherches appliquées sont disponibles pour la phytodégradation. En effet, en 2010, en Europe et aux États-Unis on pouvait recenser un peu moins d'une quinzaine de sites connus sur lesquels avait été mis en place une phyto/rhizodégradation. Parmi ces essais, un seul était recensé en France. Certains essais ont été menés sur sédiments ou dans des mangroves avec des plantes de milieux humides ou tolérant la salinité. D'autres ont été menés sur des sols agricoles ou des sols pollués par diverses activités industrielles (production de voiture, production d'explosifs, etc.) avec des arbres ou des herbacées sélectionnés ou colonisatrices.

Tableau 1.1 Essais français de phytotechnologies en plein champ.

| Technique | Polluant | Amendement | Plantes | Lieu | Surface | Référence |
|--|--|---|--|--|-----------|---|
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium / Nickel | Cendres volantes, Fe ⁰ | Maïs | Louis Fargues (33) | Parcelles | Mench <i>et al.</i> (2007), Boisson <i>et al.</i> (1998) |
| Phyto-stabilisation aidée | Cuivre / Arsenic / Chrome | Compost, dolomite, Fe ⁰ | <i>Agrostis capillaris</i> , <i>A. gigantea</i> , peuplier, saules, <i>Miscanthus</i> | Biogeco (33) | Parcelles | Bes <i>et al.</i> (2009), Mench <i>et al.</i> (2010) |
| Phyto-stabilisation aidée | Arsenic | Grenaille d'acier | Mélanges de poacées* et d'herbacées dicotylédones | La Combe du Sault (11) | 10 ha | Difpolmine, phytoperf (voir exemple) |
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic | Amendement minéral basique, hydroxylapatite | <i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Festuca rubra</i> , végétation colonisatrice | Lallaing (59) | Parcelles | Bert <i>et al.</i> 2012 |
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic | Amendement minéral basique | <i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Salix viminalis</i> (var Inger et Tordis) | Fresnes sur Escault (59) | 1 ha | Phytosed Ec1 (voir exemple) |
| Phyto-stabilisation aidée | Arsenic, Mercure | Amendement biologique | Peupliers (var Skado et I214) et aulne | Tavaux (39) | 1 ha | BIOFILTREE |
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic | Amendement biologique | Peupliers (var Skado et I214) et aulne | Pierrelaye (95) et Fresnes sur Escault (59) | 2 ha | BIOFILTREE |
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium / Nickel | Béringite, grenaille d'acier | Maïs | Couhins (33) | Parcelles | Boisson <i>et al.</i> (1998) |
| Phyto-stabilisation aidée | Cadmium, Chrome, Cuivre, Nickel, Plomb, Zinc | MIATE, BRF | Mélanges de poacées* et d'herbacées dicotylédones | Châteauneuf (42) | Parcelles | Physafimm |
| Phyto-stabilisation (aidée et non aidée) | Cadmium / Plomb / Zinc | Cendres volantes | Trèfle, ray-grass, aulne, acacia, chêne, érable, saule, <i>miscanthus</i> | Evin-Malmaison, Courcelles Les Lens et Noyelles-Godault (62) | 4 ha | PHYTENER, Lopareva-Pohu <i>et al.</i> (2011), Bidard <i>et al.</i> (2007) |

| Technique | Polluant | Amendement | Plantes | Lieu | Surface | Référence |
|---|------------------------------|------------------|---|---------------------------------|-----------|---|
| Phyto-stabilisation et phyto-extraction | Cadmium / Zinc | / | Peupliers (14 cultivars*) | Pierrelaye (95) | 5 ha | Phytopop |
| Phyto-extraction | Cuivre | / | Tournesol | Biogeco (33) | Parcelles | Kolbas <i>et al.</i> (2009) |
| Phyto-extraction | Cadmium / Zinc | / | <i>Thlaspi caerulescens</i> | La Bouzule (54) | Parcelle | Schwartz <i>et al.</i> (2003) |
| Phyto-extraction | Plomb | / | <i>Pelargonium</i> | Bazoches, Toulouse (31) | Parcelle | Arshad <i>et al.</i> (2008) |
| Phyto-extraction | Zinc / Cadmium, Zinc, Titane | / | <i>Noccea caerulescens</i> <i>Anthyllis vulneraria</i> <i>Iberis intermedia</i> | Saint Laurent Le Minier (30) | 2,5 ha | Projet Ingecotech (voir exemple) |
| Phyto-rhizo-dégradation | HAP / Cuivre | Compost, dolomie | <i>Miscanthus</i> | Biogeco (33) | Parcelle | PHYTODEMO |
| Phyto/rhizo-dégradation | HAP, métaux | / | | Homécourt (54) | Parcelles | Ouvrard <i>et al.</i> (2011) et Multipolsite (voir exemple) |

Pour en savoir plus

Mench *et al.* (2009a ; 2009b ; 2010); Vangronsveld *et al.* (2009) ; Bert *et al.* (2009) ; Ernst & Young (2010 & 2012)

<http://lbewww.epfl.ch/COST837/>

<http://w3.gre.ac.uk/cost859/>

<http://www.safir-network.com/>

1.3 Enjeux

Les enjeux diffèrent en fonction du stade de développement des phytotechnologies.

1.3.1 La phytostabilisation

Les connaissances actuelles et le retour d'expérience sur la mise en place de la phytostabilisation (aidée) laissent penser que cette technique est en phase de démonstration à l'échelle du champ. Les travaux de recherche en cours et à venir restent nécessaires pour continuer à améliorer les connaissances scientifiques sur ce mode de gestion (écologie et fonctionnalité des sols, biodiversité, écotoxicité, etc.).

Les enjeux concernent les phases de suivi et de surveillance de la technique afin de garantir un niveau de maîtrise des impacts au moins équivalent à celui des techniques conventionnelles de gestion des sites pollués. Elle doit présenter des avantages par rapport aux autres

solutions disponibles et se révéler économiquement viable. Un des points cruciaux pour garantir l'applicabilité de cette technique est de démontrer que l'espace immobilisé peut bénéficier d'une valorisation économique via l'utilisation de la biomasse produite dans une filière non alimentaire ou d'une valorisation écologique en aménagement paysager.

L'utilisation de la phytostabilisation (aidée) conjointement avec la valorisation du site pollué devrait permettre le renforcement de la mise en sécurité du site du fait d'un meilleur contrôle des voies de transfert et d'une plus value sociale et économique.

1.3.2 La phytoextraction

D'importants progrès ont été réalisés au niveau expérimental, mais les connaissances sont encore parcellaires et l'application pratique de cette technologie démarre à peine. Elle doit prouver son efficacité, et présenter des avantages par rapport aux autres solutions disponibles. Aux Etats-Unis, la viabilité économique de la phytoextraction du nickel et de sa récupération a été démontrée scientifiquement. En Europe et en France, plusieurs projets sont en cours pour valider la viabilité économique de filières potentielles (ex : phytoextraction du zinc, du nickel, du manganèse, du cuivre, du thalium et fabrication de nouveaux écomatériaux catalytiques et réactifs de synthèse organique, phytoextraction du zinc et du cadmium et valorisation de la biomasse en bois-énergie ou en méthanisation).

1.3.3 La phytodégradation

Comme dans le cas de la phytoextraction, l'application pratique de cette technique en est à ces débuts. Les potentiels d'utilisation des plantes et des microorganismes associés dans la dégradation des polluants organiques sont nombreux et, en même temps, limités par les caractéristiques physico-chimiques des polluants qui définissent leur persistance et leur biodisponibilité* dans l'environnement. L'application de la phytodégradation passe par la démonstration de l'efficacité *in situ* et par l'acquisition de connaissances sur les interactions complexes entre les polluants, le sol, les microorganismes et les plantes.



Applicabilité

2.1 Compétences nécessaires

Dans le cahier des charges d'un projet d'aménagement, l'utilisation des phytotechnologies pour gérer tout ou partie des sols pollués du projet peut être mentionnée. Dans ce cas, l'équipe projet doit démontrer sa compétence dans le domaine des phytotechnologies.

L'équipe projet pourra se composer de personnes ayant des compétences :

- **en phytotechnologies ;**
- **en gestion des sites et sols pollués.**

Ces personnes seront à même de déterminer les besoins supplémentaires (hydrologie, biologie végétale, toxicologie, aménagement paysager, écologie, agronomie...) spécifiques à chaque site ; un bureau d'études spécialisé ou des spécialistes des domaines pourront être consultés.

L'équipe de travaux pourra être composée de :

- professionnels des espaces verts et de la foresterie ;
- professionnels agricoles.

Le chef de projet veillera à informer ces personnels non habitués à travailler sur des sols pollués aux pratiques des professionnels des sols pollués (ex. : vêtements à usage unique ou dédiés au chantier, port de gants et de masque anti-poussière).

Pour en savoir plus

Rapport du projet PHYTOPERF (2012)

2.2 Caractérisation du site et paramètres clefs

La caractérisation précise du site est indispensable pour valider l'applicabilité des phytotechnologies sur le site et pré-sélectionner la (les) phytotechnologie(s) la (les) plus appropriée(s) et écarter celle(s) inadaptée(s) à partir de la connaissance de paramètres simples concernant le site, ses usages actuels et choisis, le(s) polluant(s) et le sol et d'identifier les paramètres susceptibles de limiter la faisabilité et les performances des techniques.

Après avoir rassemblé les **informations sur l'historique du site**, il convient de le caractériser d'un point de vue **topographique, géologique, hydrogéologique et patrimonial** (inventaire faune et flore, intérêt écologique du terrain). Le diagnostic pollution se fait sur la base d'un échantillonnage à des profondeurs différentes de sol et selon le référentiel réglementaire (voir Partie II, Aspects réglementaires). En fonction des activités historiques sur le site, les **polluants recherchés** sont inorganiques (éléments traces, cyanures, sulfates, etc.) ou organiques (HAP, PCB, pesticides, halogénochlorés etc.). Le diagnostic pollution pourra être complété par d'autres analyses afin d'évaluer les limitations que pourraient rencontrer les phytotechnologies ; par exemple :

- **analyse granulométrique ;**
- mesure de **pH ;**
- analyse de la **matière organique et des carbonates ;**
- analyse de l'**azote total et assimilable ;**
- calcul du **rapport carbone/azote ;**
- analyse du **phosphore assimilable ;**
- mesure de la **teneur en eau du sol ;**
- mesure de la **capacité d'échange cationique***.

Des **éléments climatiques** tels que le taux de précipitation annuel sur le site, la répartition annuelle des précipitations et les températures sont aussi des éléments à considérer.

La connaissance de ces paramètres doit servir à orienter le **choix des espèces**, les **travaux du sol** (décompactage, etc.) et les **pratiques agronomiques** éventuelles à mettre en place (fertilisation, irrigation, etc.).

Pour en savoir plus

Guide traitabilité de l'ADEME (2009)

ITRC phytotechnology technical and regulatory guidance and decision tree

<http://itrcweb.org/Documents/PHYTO-3.pdf>

2.3 Protocole de mise en place et d'entretien

Plusieurs variantes de protocole sont à envisager en fonction de l'état initial du sol qui doit être géré par les phytotechnologies (sol nu ou déjà végétalisé), de l'incorporation ou non d'amendements et de l'usage prévu de la biomasse produite. Cependant toutes les techniques de phytoremédiation possèdent les mêmes principales étapes (figure 2.1).

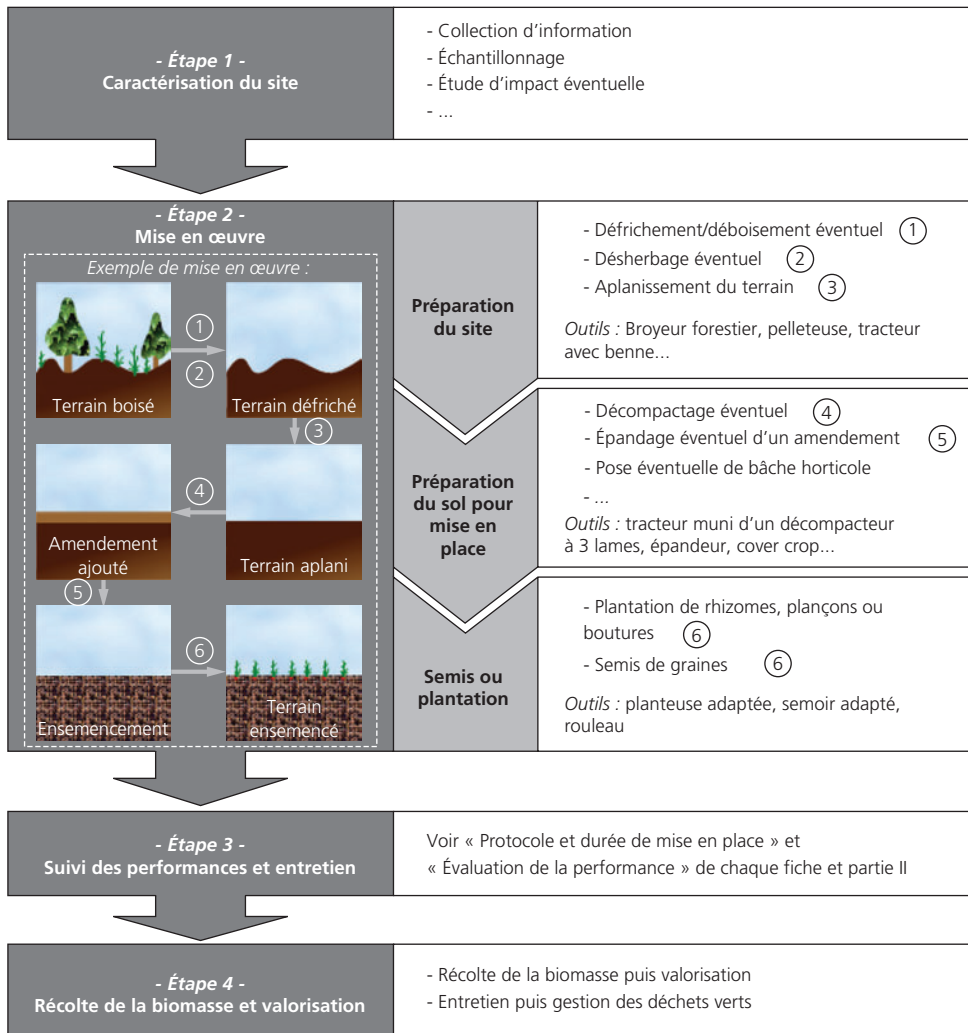


Figure 2.1 Principales étapes de la mise en œuvre d'une phytotechnologie.

Lors de la définition du protocole de mise en place et d'entretien, les aspects réglementaires concernant les étapes de mise en œuvre (étape 2) et de récolte et valorisation de la biomasse (étape 4) seront à considérer.

L'entretien dépend principalement de deux facteurs :

- des espèces plantées : arbre, arbuste, herbacée... ;
- de l'objectif : valorisation de la biomasse, restauration de la biodiversité...

Dans le cas notamment des plantations de saules et de peupliers, des désherbages réguliers sont à envisager pour maîtriser la concurrence herbacée.

2.4 Avantages et limites des phytotechnologies

2.4.1 Avantages

Les principaux avantages de ces techniques sont :

- **leur adéquation avec les principes du développement durable** (ex. : le site est faiblement perturbé, utilisation à bon escient des ressources de la nature). À ce titre elles bénéficieraient d'un écho favorable de l'opinion publique ;
- **la possibilité d'une valorisation foncière** (ex. : aménagement paysager pérenne) ;
- **la possibilité de gestion *in situ* des terres** par rapport aux techniques nécessitant excavation et transport.

De plus, l'apport d'une couverture végétale, quel que soit le procédé utilisé, est essentiel pour :

- **limiter l'érosion du sol** ;
- **limiter l'envol de poussières** ;
- **limiter le lessivage** des éléments toxiques et leur transfert vers la nappe phréatique ;
- **maintenir ou restaurer une microflore et une microfaune** adaptée, garants de la fonctionnalité des sols.

2.4.2 Limites

On peut citer quelques limites :

- Quelle que soit la phytotechnologie envisagée, les plantes n'ont accès qu'aux polluants qui se trouvent dans le sol colonisé par leurs racines (en moyenne jusqu'à 50 cm de profondeur). En fonction des espèces végétales, cette zone peut s'étendre jusqu'à 1,5 m de profondeur.
- Les plantes n'ont accès qu'à une partie de la fraction totale d'éléments traces. Les mécanismes de rechargement de cette fraction et d'absorption par les plantes sont encore largement méconnus. Du fait de cette limitation, la phytoextraction est une technique de dépollution partielle et non de décontamination. De plus, cette limitation impacte le temps nécessaire pour diminuer la contamination.
- Au regard des connaissances actuelles sur les phytotechnologies et quelle que soit la phytotechnologie envisagée, les sites gérés par ces techniques ne peuvent accueillir que des projets de longue durée, durée qui dépend des usages présents et futurs du site. La phytostabilisation peut se révéler efficace dans un délai court par rapport aux objectifs

qu'elle cherche à atteindre. La mise en place de la phytostabilisation s'envisage cependant pour une durée permettant de justifier l'investissement (aménagement paysager pérenne, gestion de la pollution en attendant de décider de l'usage futur d'un site, gestion de la pollution couplée à l'exploitation de la biomasse, etc.).

La durée, qui peut apparaître comme une contrainte, pourrait être compensée par la valorisation du foncier via la valorisation économique de la biomasse produite sur le site pollué ou la valorisation écologique (aménagement paysager, restauration des services écosystémiques*). Cette hypothèse est actuellement testée dans des projets français et européens. Ainsi l'objectif des phytotechnologies n'est plus seulement de dépolluer ou de maîtriser les risques mais d'apporter une plus value au site en générant une activité qui peut être rentable (ex. : culture énergétique, hydrométallurgie, synthèse écocatalysée de principes actifs).

Cas spécifique de la multicontamination

Un sol peut contenir des mélanges de polluants inorganiques (éléments traces, etc.) et organiques (HAP, PCB, solvants chlorés, dioxines, etc.). Lors de la phytostabilisation ou de la phytoextraction, les plantes et les microorganismes rhizosphériques* ou endophytiques* associés peuvent simultanément dégrader tout ou partie des polluants organiques présents dans le sol. De même, lors de la phyto- ou rhizodégradation, les plantes en fonction de leur nature (hyperaccumulateurs ou plantes ne transférant pas les éléments traces dans les parties aériennes) et les microorganismes rhizosphériques* ou endophytiques* associés peuvent simultanément extraire ou immobiliser les éléments traces du sol.

Les effets des plantes en milieu multicontaminé ont rarement fait l'objet d'étude à cause de la complexité du suivi et des analyses à effectuer. De ce fait, le devenir de polluants multiples du sol, organiques et inorganiques, sous l'influence de diverses espèces végétales et de microorganismes associés est mal connu à ce jour.

Pour en savoir plus
Ouvrard *et al.* (2011)

2.5 Évaluation de la performance

La performance d'une phytotechnologie sera principalement évaluée à travers l'efficacité des espèces végétales et des éventuels amendements ; les mesures à effectuer sont :

- **Le recouvrement au sol des espèces végétales** ; ce critère important est en lien avec les objectifs de limitation de l'érosion du sol et de l'envol des poussières et de diminution du lessivage du sol (*méthode de calcul visuelle, résultat exprimé en pourcentage de recouvrement*).
- **Les concentrations en polluants** (éléments traces, organiques) **dans les parties aériennes** doivent être évaluées pour confirmer le choix des espèces végétales sélectionnées et surveiller les concentrations pour les espèces qui ont colonisé le milieu (*en mg de polluant / kg de poids sec de plante*).
- **La mobilité des polluants** (éléments traces, organiques) **dans le sol** ; les polluants sont mesurés **dans la solution du sol par des racines artificielles (rhizon) ou après extraction chimique**. Parmi les méthodes d'extraction chimique d'éléments traces les plus employées, on peut citer : extraction des éléments traces par une solution tamponnée

de DTPA (NF ISO 14870), extraction du cuivre et du zinc par l'acétate d'ammonium en présence d'EDTA (NF X 31-120), extraction à l'eau déminéralisée, extraction au chlorure de calcium (0,01M), extractions séquentielles adaptées selon Tessier *et al.* (1979), etc.

- **Le rendement en biomasse** lorsque l'exploitation de la culture est envisagée (*en t/ha*).
- **Les indicateurs physico-chimiques et agronomiques** (pH, taux de matière organique, capacité d'échange cationique*, etc.) peuvent permettre d'apprécier l'amélioration des propriétés du sol.
- **Les indicateurs de biodiversité** microflore, flore et faune (richesse spécifique, indice de Shannon, etc.) lorsque l'augmentation ou la restauration de la biodiversité est un objectif affiché de la mise en place de la phytotechnologie.

En détails

Le RHIZOtest a été développé spécifiquement pour déterminer la phytodisponibilité des éléments traces. Il est en train d'être validé à l'aide d'essais interlaboratoires devant permettre l'acceptation finale de la norme ISO (ISO/CD 16 198).

L'indice PhytoMet est un indice intégrant les anomalies concernant les concentrations foliaires arsenic, cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc et tenant compte de l'écotoxicité potentielle de chacun de ces éléments.

Pour en savoir plus

Outils biologiques d'évaluation des risques pour les écosystèmes (éRé), site internet ADEME, Sites et Sols Pollués, Outils Méthodologiques

- **L'identification et la quantification des microorganismes inoculés**, si nécessaire, pourront être réalisées afin de vérifier l'efficacité des amendements biologiques.
- **Les transferts dans les chaînes trophiques terrestres** ; la biodisponibilité ainsi que l'efficacité de la remédiation peuvent être évaluées par des méthodes utilisant des bioindicateurs tels que l'escargot vivant à l'interface sol/plante/air (méthode ERITME).

En détails

La méthode ERITME permet d'évaluer le risque global de transfert de métaux du sol vers un organisme indicateur avant et après prise en charge du site.

2.6 Questions/réponses

Les phytotechnologies sont-elles utilisées en France sur les sols pollués ?

Selon l'Union des Professionnels de la Dépollution des Sites, en 2009, le secteur des phytotechnologies ne représentait que 0,03 % du chiffre d'affaire annuel des adhérents (communication de l'UPDS pour l'association Entreprises pour l'Environnement). D'après l'étude de Ernst & Young, il n'y a pas eu de terres gérées par les phytotechnologies en 2008 tandis que 5800 tonnes ont été gérées par ces techniques en 2010 (représentant 0,3 % du tonnage total de terres traitées comptabilisé dans le cadre de l'étude et 0,7 % du tonnage de terres traitées *in situ*). Les phytotechnologies sont aujourd'hui essentiellement mises en place

dans le cadre de projets de recherche appliquée ou expérimentées par les industriels sur des terrains privés. Depuis quelques années, des appels d'offre à l'initiative de collectivités concernant des projets d'aménagement sur sites pollués sont parus faisant mention des phytotechnologies parmi d'autres méthodes de gestion envisagées. De tels projets devraient prochainement voir le jour.

Pour en savoir plus

Ecollectivités (2009)

Le parisien, édition l'Oise matin (6 octobre 2010) ; étude Ernst & Young données 2010 (2012) ; étude Ernst & Young données 2008 (2010)

Quels sont les marchés potentiels des phytotechnologies ?

Les phytotechnologies peuvent être appliquées dans des projets d'aménagement sur des espaces en milieu urbain ou en milieu rural sur des espaces agricoles. En milieu urbain, les projets font appel à des paysagistes voire des architectes. En milieu rural, les projets font appel aux corps de métier relevant de l'agriculture, des espaces verts et de la foresterie. On peut citer les semenciers, les pépiniéristes, les producteurs d'amendements, etc. Les marchés potentiels des phytotechnologies sont vastes et touchent donc les professionnels de la dépollution, ainsi que les corps de métier précités.

Pourquoi les phytotechnologies ne sont-elles pas utilisées plus souvent par les professionnels de la dépollution ?

Les professionnels de la dépollution tout comme les collectivités et les propriétaires de sites pollués n'ont en général pas ou peu d'expérience sur la mise en œuvre des phytotechnologies et méconnaissent les différentes possibilités qu'offre l'utilisation des plantes. En particulier, les phytotechnologies ne concernent pas que le champ de la dépollution.

En général, les professionnels de la dépollution ont à mener des chantiers dans des délais courts et sur des espaces limités souvent impactés par des pollutions « concentrées », a priori non compatibles avec l'utilisation des phytotechnologies. De plus, bon nombre de polluants rencontrés sur ces chantiers n'ont pas ou peu fait l'objet d'expériences avec les phytotechnologies (BTEX, PCB, pesticides, solvants chlorés).

Peut-on gérer des petites surfaces avec les phytotechnologies ?

Les phytotechnologies sont particulièrement adaptées aux sites de grande surface, néanmoins, il n'y a pas de surface minimale a priori pour gérer un site avec les phytotechnologies. Dans tous les cas, le protocole est à adapter en fonction de la surface.

Les phytotechnologies sont-elles moins coûteuses que les techniques classiquement utilisées en gestion de sols pollués ?

Bien qu'assez répandue, l'idée selon laquelle les phytotechnologies sont moins coûteuses que les techniques classiquement utilisées en gestion de sols pollués ne repose pas sur une analyse économique globale de ces techniques, l'utilisation de plantes pour gérer un site pollué ne consistant pas seulement à acheter des graines et à les semer sur le site. Comme toute technique de gestion des sites pollués, les phytotechnologies nécessitent une étape de mise en place qui peut être relativement coûteuse en fonction de l'état initial du site (ex. : nécessité de déboiser ou de défricher), de la surface du site et du type de cultures à implanter, puis un suivi de la performance et une surveillance sur le long terme qui nécessitera la réalisation d'analyses. Les phytotechnologies étant en place pour une longue durée, les

analyses économiques actuellement à l'étude prennent en compte les différents scénarios de valorisation de la biomasse produite. Quelques éléments sont disponibles, suite à une étude réalisée en Belgique, concernant un scénario de phytoextraction du cadmium à l'aide de maïs valorisé en méthanisation.

Pour en savoir plus

Voir « étude de faisabilité technique et financière » de chaque phytotechnologie ;
Thewys *et al.* (2010a, 2010b)

Quels polluants peut-on traiter ?

La phytostabilisation et la phytoextraction sont des techniques utilisables pour la gestion des sols pollués par les éléments traces. La phytostabilisation peut également être utilisée sur les polluants organiques. La phytodégradation est utilisable pour le traitement des sols pollués par les polluants organiques.

Quels sont les moyens matériels nécessaires dans la mise en œuvre d'une phytotechnologie ?

Les moyens matériels nécessaires sont essentiellement ceux inhérents à la culture des plantes (matériel agricole, des espaces verts ou de la foresterie). Les outils et équipements qui seront utilisés devront faire l'objet d'un nettoyage approprié avant une réutilisation ultérieure.

Quelles précautions doivent prendre les ouvriers travaillant sur un chantier de phytoremédiation ?

Comme toute opération de gestion des sites pollués, il est impératif de prendre en considération la dangerosité des polluants et de protéger le personnel sur le chantier (ex. : port de combinaison, gants, masques) à partir d'une analyse des risques spécifiques à chaque situation.

2.7 Arbre de décision

La caractérisation du site (cf. 2.2) a permis de déterminer si les phytotechnologies pouvaient s'appliquer au site pollué à partir des données collectées (connaissance du site, de ses usages actuels et futurs, polluant(s), sol, éléments climatiques...). Les limitations induites par l'utilisation des plantes sont donc connues et acceptées.

Dans le cadre du plan de gestion du site pollué considéré, cet arbre de décision intervient à l'étape du choix de la ou des techniques à mettre en œuvre pour assurer la maîtrise ou le traitement des polluants en place, les étapes d'identification de l'usage futur du site, de diagnostic pollution du sol et d'évaluation des risques sanitaires étant réalisées en amont.

L'arbre de décision proposé ici vise à identifier parmi les phytotechnologies disponibles, celle qui serait la plus pertinente au regard des objectifs de gestion fixés pour le site (maîtrise ou réduction de(s) source(s) de pollution) et de la nature des polluants présents sur la zone concernée.

En effet, l'utilisation d'une phytotechnologie n'est pas exclusive sur un site pollué. Il peut s'avérer pertinent, en fonction des polluants mis en évidence, de gérer de manière différenciée une zone du site avec une technique et une autre zone du site avec une autre technique. De même, une zone multicontaminée (organiques et inorganiques) peut être gérée par les phytotechnologies. La concentration en polluants ne constitue pas un critère pour le choix d'une phytotechnologie plutôt qu'une autre.

Cet arbre de décision ne compare pas les phytotechnologies aux techniques couramment utilisées en gestion des sites pollués. Des études plus approfondies portant sur la réalisation d'outils d'aide à la décision sont en cours à l'échelle européenne (ex : projets REJUVENATE 1 et 2 ; GREENLAND).

Pour en savoir plus

<http://www.itrcweb.org/Documents/PHYTO-3.pdf>

<http://www.clu-in.org/download/remed/phytotechnologies-factsheet.pdf>

<http://www.greenland-project.eu/>

http://www.snowman-era.net/downloads/SUMATECS_FINAL_REPORT.pdf

Onwubuya *et al* (2009).

<http://projects.swedgeo.se/r2/index.php/contacts-2>

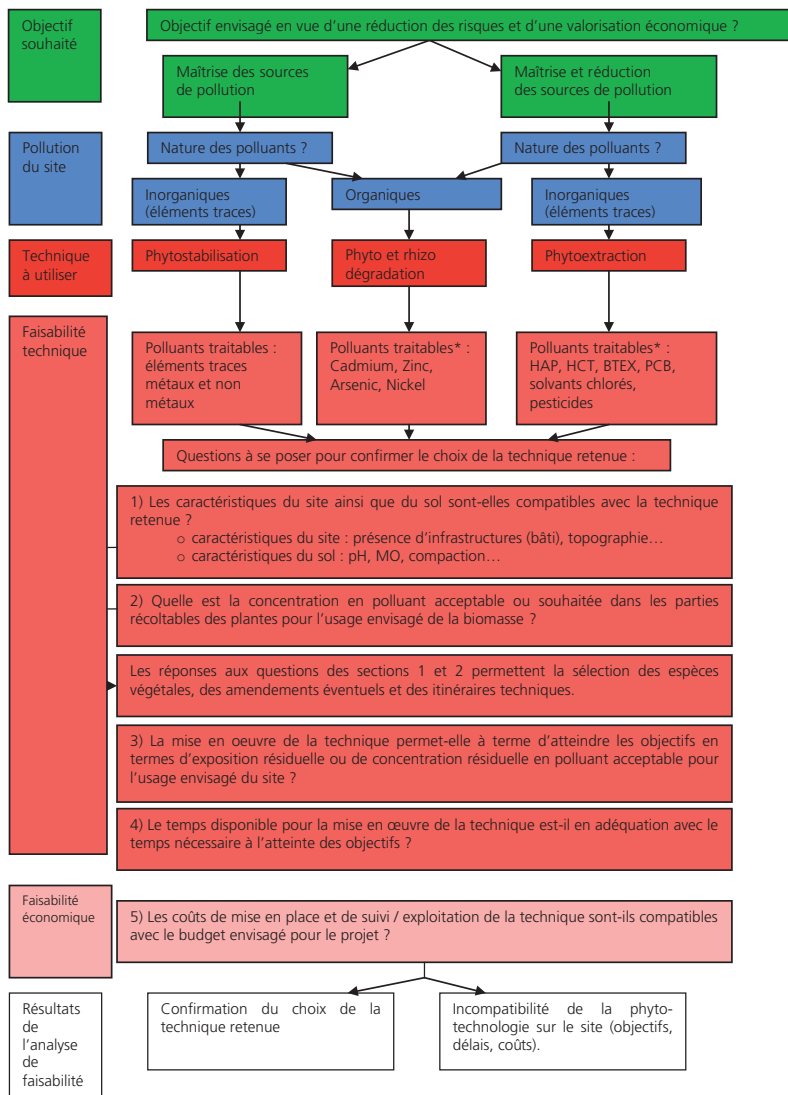


Figure 2.2 Arbre de décision.

2.8 Aspects réglementaires

2.8.1 Gestion des sites pollués

La circulaire du 8 février 2007 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement – Prévention de la pollution des sols – Gestion des sols pollués précise l'activité industrielle autorisée notamment via :

- la prévention de la pollution ;
- la maîtrise des sources de pollution ;
- la maîtrise des risques induits par une situation de pollution au regard des usages constatés ou des futurs usages du site dans le cas d'une reconversion.

Ces principes de gestion sont mis en œuvre en particulier au moment de la cessation d'activité des installations classées pour la protection de l'environnement, dans le cadre de la procédure définie par les articles **L.512-17 et 18, R.512-74 à 80 du Code de l'environnement**.

La circulaire du 8 février 2007 relative aux sites et sols pollués - Modalités de gestion et de réaménagement des sites pollués - pose les principes de gestion et définit la méthodologie.

Pour en savoir plus

<http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr>

La démarche distingue deux situations :

- soit le site est sans projet d'aménagement et l'objectif est alors de veiller à ce qu'il ne soit pas source de pollution pour l'environnement et les personnes ; pour cela la démarche consiste à dresser un schéma conceptuel, conduire un diagnostic et des investigations pour caractériser les milieux (sol, eaux...), rechercher d'éventuelles sources de pollution et interpréter l'état des milieux (IEM). La démarche d'interprétation de l'état des milieux (IEM) a pour objectif de s'assurer que l'état des milieux étudiés ne présente pas un écart significatif par rapport à la gestion sanitaire mise en place pour l'ensemble de la population française. Pour des installations en fonctionnement, il pourra être nécessaire de réaliser un contrôle ponctuel ou mettre en œuvre une surveillance dans l'environnement du site au sens de l'étude d'impact défini à **l'article 3-4 b du Décret du 21 septembre 1977**. Les résultats obtenus sont ensuite comparés :
 - à l'état de milieux naturels voisins de la zone d'investigation ou à l'état initial si disponible,
 - aux valeurs de gestion réglementaires mises en place par les pouvoirs publics,
 - aux valeurs de gestion et aux dispositions réglementaires en vigueur.

S'il apparaît que le milieu est dégradé, une évaluation quantitative des risques sanitaires est réalisée. À l'issue de l'IEM, dans le cas où certains milieux présentent des niveaux de contamination conduisant à une incompatibilité d'usage, alors un plan de gestion doit être mis en place (cf. ci-après) ;

- soit le site fait l'objet d'un projet d'aménagement futur avec nouvel usage et l'objectif est alors de caractériser l'état des milieux en recherchant d'éventuelles contaminations qui devront être prises en compte dans le projet de réhabilitation. Des travaux de dépollution,

de même que des aménagements spécifiques peuvent être engagés pour s'assurer que le site, une fois réhabilité, sera sain pour les futurs usagers. Cette démarche s'inscrit dans un plan de gestion qui est principalement basé sur la maîtrise des sources de pollution et de leurs impacts. Il est mis en place dans deux cas de figures :

- lors de l'arrêt d'une installation classée et lorsqu'une requalification d'usage est envisagée, tel que précisé à l'**article 34-3**,
- lorsque les résultats d'une IEM concluent à une mise en œuvre de mesures de gestion.

L'article 34-3. – 1 du décret du 21 septembre 1977 modifié indique la nécessité de produire un bilan « coûts/avantages ».

Dans le cas où une pollution résiduelle subsisterait à l'issue des travaux et/ou aménagements, une analyse des risques résiduels devra être menée pour valider la compatibilité de cette pollution résiduelle avec les nouveaux usages.

Pour en savoir plus

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Modalites-generales-d-application.html>

<http://www.ineris.fr/aida>

2.8.2 Travaux de préparation du terrain

La mise en place d'une technique de phytoremédiation sur un sol pollué peut nécessiter des travaux préalables de défrichage ou de déboisement. Dans ce cas, les travaux ne pourront commencer qu'après examen par la Division Protection de la Nature, Paysages et Biodiversité de la DREAL du respect de la réglementation en matière de protection de la nature.

Rappel de la réglementation :

La loi n°76-629 du 10 juillet 1976, relative à la protection de la nature abrogée et codifiée aux articles L.122-1 et suivants du code de l'environnement prévoient une étude d'impact pour la plupart des projets d'aménagement. Les textes stipulent la nécessité de faire une expertise écologique qui caractérise l'état initial des milieux concernés par le projet. Si cette expertise met en évidence la présence d'espèces protégées, le demandeur du projet a trois choix :

- soit renoncer à son projet ;
- soit modifier son projet pour supprimer les impacts directs et indirects sur les espèces protégées, leurs conditions de vie et leurs habitats ;
- soit maintenir son projet en réduisant au maximum les impacts sur les espèces protégées et leur habitat, mais dans l'impossibilité de les réduire totalement. Ce dernier cas impose la conception d'un dossier relatif à une autorisation exceptionnelle portant sur des espèces protégées à des fins non scientifiques (destruction ou transfert).

Au sein du code de l'Environnement l'article L.411-1 pose l'interdiction de détruire une espèce protégée et son habitat. Les espèces concernées sont listées dans cet article.

L'article L.411-2 du même code mentionne la délivrance possible d'autorisation exceptionnelle de prélèvement de ces espèces uniquement à des fins scientifiques. Toutefois, **l'arrêté du 16 décembre 2004** modifie les listes d'espèces protégées de certains groupes faunistiques

et autorise pour quelques raisons justifiées, la destruction de ces espèces à condition que cela ne nuise pas au maintien des populations dans leur aire de répartition.

De façon très exceptionnelle, pour un projet d'aménagement d'utilité publique et/ou d'intérêt général qui porterait atteinte à une ou plusieurs espèces protégées (animales ou végétales) sans autres alternatives possibles, une procédure spécifique peut être envisagée : un dossier de demande exceptionnelle de dérogation à la législation concernant les espèces protégées et leur habitat doit être établi.

La circulaire du 21 janvier 2008 précise les conditions incontournables pour l'octroi de dérogation :

- à condition qu'il n'existe pas d'autre solution satisfaisante ;
- à condition que la dérogation ne nuise pas au maintien de l'état de conservation favorable de l'espèce dans son aire de répartition naturelle.

Le dossier de demande devra répondre aux exigences formulées dans l'Arrêté ministériel du 19 février 2007 à celles des DNP no. 98-1 du 3 février 1998, DNP no. 00-02 du 15 février 2000 et DNP no. 2008-01 du 21 janvier 2008 cité ci-dessus.

Pour en savoir plus

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Modalites-generales-d-application.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-differents-textes-en-vigueur.html>

<http://www.developpement-durable.gouv.fr/Les-principaux-elements.html>

(JO du 13 juillet 1976)

* Arrêté du 16 décembre 2004 portant modification Officiel des espèces et variétés de plantes cultivées en France (semence de lin et chanvre) (JO n°299 du 24/12/2004)

* Circulaire DNP/CFF n°2008-01 du 21 janvier 2008 relative aux décisions administratives individuelles relevant du ministère chargé de la protection de la nature dans le domaine de la faune et de la flore sauvages (BO MEDAD n° 6/2008 du 30/03/2008)

* Circulaire DNP n°98-1 du 3 février 1998 relative à la déconcentration de décisions administratives individuelles relevant du ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (Texte non publié au JO)

* Circulaire DNP n°00-02 du 15 février 2000 relative à la déconcentration de décisions administratives individuelles relevant du ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement dans le domaine de la chasse, de la faune et de la flore sauvages (Texte non publié au JO)

2.8.3 Amendements

L'utilisation d'amendement, qu'il soit chimique ou biologique implique le respect de contraintes spécifiques. Les amendements tels que considérés par la réglementation et la normalisation sont utilisés pour assurer ou améliorer la nutrition des végétaux ainsi que les propriétés des sols et non pas pour stabiliser ou extraire les éléments traces ou dégrader les polluants organiques. Ainsi, la réglementation et la normalisation encadrant l'utilisation des amendements peuvent constituer une contrainte sur le choix de l'amendement et la quantité maximale à épandre pour obtenir l'effet souhaité sur les éléments traces ou les polluants organiques. En résumé, les matières fertilisantes et les supports de culture sont réglementés en droit français par les articles **L.255-1 et suivants du code rural**. À ce titre, sous réserve de leur innocuité pour les consommateurs, les travailleurs, les animaux et l'environnement,

leur mise sur le marché et leur utilisation ne sont autorisées que s'ils répondent à l'une des deux conditions suivantes :

- ils sont **conformes à la norme européenne « engrais CE »** ou à une norme française NFU rendue d'application obligatoire ;
- ils ont fait l'objet au préalable **d'une homologation, d'une autorisation provisoire de vente, ou d'importation de la part du ministère de l'agriculture et de la pêche.**

En détails

D'après les articles L.255-1 et L.255-11 du code rural, les matières fertilisantes comprennent les engrais, les amendements dont ceux à base d'inoculum* de microorganismes, des supports de culture et, d'une manière générale, tout produit dont l'emploi est destiné à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux (en stimulant directement la croissance et le développement des plantes, en fournissant aux plantes de l'azote prélevé de l'atmosphère, ou en augmentant la disponibilité des éléments fertilisants pour les plantes) ainsi que les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Les références des réglementations en vigueur à respecter sont (liste non exhaustive) : L.255-11, R.255-1 à R.255-3, L.255-2 du code rural ; règlement (CE) n° 2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 ; NFU 44-095 (2002) ; NF U 44-051 (2006) ; NF U 44-001 (2009).

Certains produits chimiques utilisables en phytoextraction sont des substances actives entrant dans la composition de produits phytosanitaires ou biocides. A ce titre, ils sont réglementés par le règlement européen 1107/2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques entré en application le 14 juin 2011 et par la directive communautaire 98/8/CE relative à la mise sur le marché des produits biocides, transposée en droit français aux articles L.522-1 et suivants du code de l'environnement (e-phy.agriculture.gouv.fr).

Pour en savoir plus

* Règlement (CE) n°2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais (JOUE L n°304 du 21/11/2003)

* Règlement (CE) n°1107/2009 du Parlement européen et du Conseil du 21 octobre 2009 concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques et abrogeant les directives 79/117/CEE et 91/414/CEE du Conseil (JOUE L n°309 du 24/11/2009)

* Directive n°98/8/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 février 1998 concernant la mise sur le marché des produits biocides (JOUE L n°123 du 24/04/1998)

2.8.4 Gestion de la biomasse produite sur sols pollués

Le statut de la biomasse produite sur sol pollué (biomasse ou déchet ?) constitue une question essentielle pour décider de son mode de valorisation, et donc du coût ou du bénéfice qui pourra en découler. Cette question n'est pas encore tranchée au plan réglementaire.

La réflexion est en cours au niveau européen. Par exemple, le programme de recherche GREENLAND (FP7, 2011-2014, <http://www.greenland-project.eu/>) vise à apporter des éléments de réponse, notamment en interrogeant les représentants des États et des agences de différents pays européens sur ce statut.

La réflexion est également en cours en France. Les considérations à prendre en compte sont notamment : la définition de déchets et la notion d'abandon ; le fait que la biomasse est issue

d'un site pollué et la définition de tels sites ; la réglementation relative à la combustion et la définition de la biomasse dans ce contexte ; la sortie du statut de déchet ; la gestion des terres excavées. Des évolutions de la réglementation sur ces différents thèmes sont en cours indépendamment de toute réflexion sur les phytotechnologies. On rappellera notamment qu'il existe plusieurs définitions réglementaires du terme « biomasse » que l'on peut trouver dans les textes relatifs aux énergies renouvelables, aux quotas de CO₂ et aux émissions industrielles, que ce soit au niveau européen ou national.

Des travaux sur les phytotechnologies en cours ou achevés au niveau français (par ex. : PHYTOPOP, PHYTENER, PHYTOSED Échelle 1, BIOFILTREE) et européen (par ex. : GREENLAND) ont dans leurs objectifs d'évaluer la maîtrise et le devenir des polluants dans la biomasse récoltée sur sols pollués. Dans le cas de la phytoextraction et de la phytodégradation, l'enjeu est de prévenir un éventuel transfert de polluants des sols vers d'autres milieux (eau, air, etc.). Dans le cas de la phytostabilisation, où les transferts de polluants dans les plantes utilisées sont limités, l'enjeu est de démontrer que la biomasse produite sur sol pollué serait assimilable à de la biomasse dite « naturelle ».

Pour en savoir plus

<http://www.ineris.fr/aida>

Code de l'Environnement, Livre 5 Prévention des pollutions des risques et des nuisances - Titre IV : Déchets - Titre 1 : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement. Définition de l'article L.541-1-1 du code de l'environnement.



Phytostabilisation

3.1 Descriptif technique

3.1.1 Mécanisme

La phytostabilisation est une technique *in situ* de stabilisation basée sur l'utilisation des plantes. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un **mode de gestion des sites et sols pollués destiné à immobiliser les polluants dans le sol.**

Les plantes, éventuellement en combinaison avec des amendements (phytostabilisation aidée), empêchent ou limitent la mobilité des polluants via une stabilisation mécanique et (bio)chimique prévenant ainsi le transfert des polluants vers les différents compartiments de l'environnement et dans la chaîne alimentaire.

Dans le cas de la phytostabilisation aidée, les amendements (encore appelés agents immobilisants) diminuent la disponibilité des polluants pour les plantes via divers mécanismes de précipitation/sorption et la phytotoxicité éventuelle permettant ainsi l'établissement d'une couverture végétale sur un site pollué.

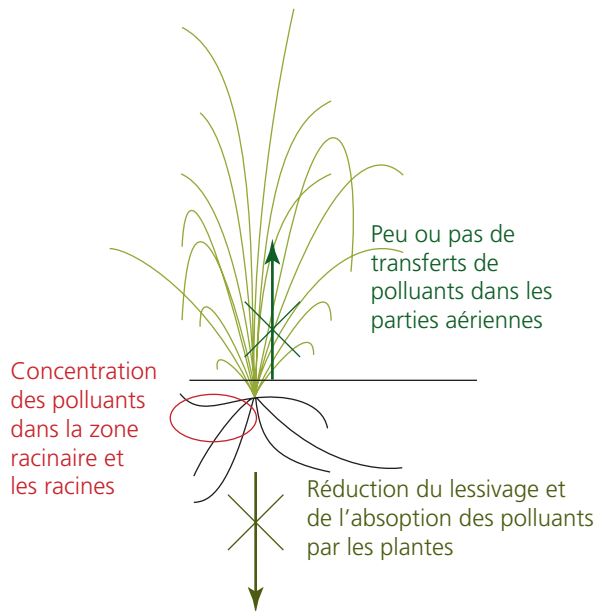


Figure 3.1 Schéma de fonctionnement de la phytostabilisation.

La biomasse produite sur un site phytostabilisé contient peu de polluants car les plantes sélectionnées excluent les polluants ou présentent un transfert limité de polluants dans leurs parties aériennes (tiges et feuilles). Il est donc envisageable que cette biomasse soit récoltée et valorisée dans le cadre, par exemple, de la filière bois-énergie ou d'une filière industrielle non alimentaire.

En détails

Les plantes agissent sur la stabilisation des polluants en les accumulant dans leurs racines (séquestration) ou en les précipitant sur leurs racines ou dans la zone racinaire. Les plantes peuvent modifier la forme chimique des polluants en changeant l'environnement du sol autour de leurs racines (pH, potentiel d'oxydo-réduction, etc.). Les microorganismes (bactéries et mycorhizes*) vivant dans la rhizosphère* des plantes peuvent aussi changer la forme chimique des polluants, aider la plante à séquestrer les polluants, à diminuer leur toxicité et ainsi participer activement à la phytostabilisation.

Pour en savoir plus

Vangronsveld *et al.* (2009) ; Bert *et al.* (2009) ; Mench *et al.* (2009) ; Mench *et al.* (2010)

3.1.2 Polluants traités

Les polluants susceptibles d'être immobilisés sont les **métaux** (par ex. : zinc, cadmium, plomb, cuivre, chrome) et les **métalloïdes** (arsenic), regroupés sous la terminologie **d'éléments traces**.

Lors de la présence simultanée de polluants inorganiques et organiques, ces derniers peuvent être éventuellement dégradés par les microorganismes rhizosphériques* (voir partie *phyto et rhizodégradation*).

3.2 Préconisations

3.2.1 Choix techniques

3.2.1.1 Choix des espèces végétales

Les espèces végétales utilisées pour la phytostabilisation doivent posséder deux principales caractéristiques :

- **peu ou pas de transfert vers les parties aériennes** ;
- **résistance aux polluants présents** (nature et concentration).

De manière générale, les plantes de la famille des poacées* présentent les deux caractéristiques précitées.

Les plantes doivent être de préférence :

- **des espèces locales**, adaptées aux conditions climatiques du site, rustiques et ubiquistes* sauf si le site présente des conditions écologiques particulières (ex. : pH basique, salinité) ;
- **vivaces** de façon à ce que le sol soit recouvert par les végétaux quelque soit la saison et capables de former rapidement un tapis pour limiter l'érosion du sol, les envols de poussières et le lessivage. De plus, il est préférable que leur système racinaire soit dense et profond pour augmenter le contact avec les particules de sol et les polluants.



Figure 3.2 *Peuplier* (photo du projet BIOFILTREE – Valérie Bert).



Figure 3.3 *Miscanthus* (photo du projet PHYTENER).

Les espèces végétales peuvent être des plantes herbacées, des arbustes ou des arbres. Lorsque le choix se porte sur des arbustes ou des arbres, il est préconisé de mettre en place une couverture herbacée au sol pour augmenter la surface de sol stabilisé, tout en tenant compte de la compétition pour l'eau et les éléments nutritifs des herbacées vis-à-vis des espèces de ligneux plantés. Les espèces invasives sont à proscrire.

Le choix des espèces se base **sur le futur usage du site** (aménagement paysager, culture de biomasse non alimentaire) puis sur le **type de valorisation** retenue. Au vu des connaissances actuelles sur la phytostabilisation, il est possible d'envisager la valorisation des biomasses produites dans différentes filières existantes ou en développement. Les projets de recherche en cours visent à confirmer la faisabilité technique, économique et réglementaire de différentes filières de valorisation.

En détails

Des arbres de la famille des Salicacées (peupliers et saules), préconisés en vue d'une valorisation énergétique, peuvent être utilisés en phytostabilisation. Ces arbres sont connus pour transférer dans leurs bois et leurs feuilles certains éléments traces métalliques (Zinc et Cadmium) dans des concentrations qui varient beaucoup d'une espèce à l'autre et d'un cultivar* à l'autre. Il conviendra de choisir le(s) cultivar(s)* les plus appropriés pour la phytostabilisation (c'est-à-dire ceux transférant le moins de polluant) en fonction des connaissances scientifiques du moment et des disponibilités commerciales. L'ajout d'amendements chimiques ou biologiques (phytostabilisation aidée) peut être une option pour diminuer le transfert des polluants dans ces arbres (ex. : projet PHYTOSED échelle 1, voir exemple).

Tableau 3.1 Association des filières de valorisation et des espèces de plantes utilisées pour la phytostabilisation.

| | Usage futur | Espèces préconisées | Noms latins |
|-----------------------------|---|---|---|
| Valorisation de la biomasse | Bois-énergie | Arbres et arbustes à croissance rapide et à forte biomasse ; miscanthus | <i>Salix sp., Populus sp., Miscanthus sp.</i> |
| | Compostage | Poacées* | |
| | Méthanisation à la ferme | Maïs ; tournesol ; luzerne ; blé | <i>Zea maïs, Heliantus annuus, Medicago sativa, Triticum sp.</i> |
| | Éco-matériaux | Miscanthus | <i>Miscanthus sp.</i> |
| | Gazéification | Tout type de biomasse | <i>Salix sp., Populus sp., etc.</i> |
| | Bioraffineries (biocarburants, etc.) | Blé ; maïs ; tournesol | <i>Triticum sp., Zea maïs, Heliantus annuus</i> |
| Valorisation écologique | Aménagement paysager | Saules, calamagrostide, joncs | <i>Salix sp., Calamagrostis sp., Juncus sp.</i> |
| | Accroissement de la biodiversité (trame verte et bleue) | Végétation colonisatrice | <i>Agrostis sp., Lolium perenne, Calamagrostis sp., Festuca sp., Deschampsia sp. Phragmites australis, Typha sp., Alnus glutinosa, Robinia pseudoacacia, etc.</i> |
| | Non connu | Végétation colonisatrice | <i>Agrostis sp., Lolium perenne, Calamagrostis sp., Festuca sp., Deschampsia sp. Phragmites australis, Typha sp., Alnus glutinosa, Robinia pseudoacacia, etc.</i> |

Si aucune valorisation économique sur le sol phytostabilisé n'est envisagée, le choix peut être fait de laisser une végétation colonisatrice s'installer pour accroître la biodiversité. Ce choix nécessite un diagnostic des espèces présentes et des risques de transfert. Si ce diagnostic confirme cette option de gestion, il est alors conseillé de surveiller cette végétation de manière proportionnée aux risques de transfert de polluants (chaîne alimentaire, envol, lessivage). Dans les deux cas, un diagnostic des espèces présentes sur le site avant toute mise en œuvre devra être effectué.

Dans le cas où la phytostabilisation concerne une surface significative de sol ou qu'une valorisation de la culture est envisagée, le choix des espèces est en grande partie contraint par la disponibilité commerciale des semences et des boutures et par l'existence d'itinéraires techniques qui permettent la culture et la récolte de l'espèce végétale.

Pour en savoir plus

Mench *et al.* (2010) ; Robinet (2009)

3.2.1.2 Choix des amendements

Le rôle des amendements est d'immobiliser les métaux et métalloïdes dans le sol en réduisant leur mobilité. L'immobilisation peut être obtenue par incorporation d'amendements chimiques ou biologiques.

Amendements chimiques

Les mécanismes de stabilisation chimique sont variés (adsorption à des surfaces minérales, formation de complexes stables avec des ligands organiques, précipitation, co-précipitation, échange ionique) et dépendent de nombreux facteurs (pH, potentiel d'oxydo-réduction, capacité d'échange cationique*, constituants du sol, etc.). Dans l'immobilisation des métaux et métalloïdes, il est rare qu'un seul mécanisme soit incriminé.

Les composants de l'amendement pouvant avoir plus ou moins d'affinité avec le polluant, le choix de l'amendement chimique dépendra du type de polluant. Un sol étant rarement pollué par un seul polluant, il conviendra de sélectionner l'amendement en fonction du(des) polluant(s) majoritaire(s), du(des) polluant(s) le(s) plus toxique(s) ou mobile(s). Des mélanges d'amendements sont aussi envisageables bien qu'il y ait peu de retour d'expérience *in situ* sur ce point.

Parmi les amendements les plus couramment étudiés, et disponibles sur le marché, pour stabiliser les métaux et l'arsenic dans les sols pollués, on peut citer (liste non exhaustive) :

- les zéolites naturelles ou synthétiques ;
- les argiles ;
- les cendres volantes ;
- la chaux et les amendements riches en chaux ;
- les amendements riches en phosphate (phosphate de calcium, apatite, hydroxyapatite, etc.) ;
- les amendements riches en oxyhydroxydes de fer, de manganèse et d'aluminium (laitiers, scories Thomas, grenaille d'acier, etc.) ;
- les amendements riches en matière organique (compost, boues, bio-solides, etc.).

Le tableau ci-dessous présente quelques exemples de préconisation d'amendement en fonction de la nature du polluant.

Tableau 3.2 Association des polluants avec des amendements (préconisés ou à éviter).

| Polluant | Mécanismes contrôlant la mobilité | Amendements préconisés | Amendements à éviter |
|----------|--|---|--|
| Arsenic | Adsorption Désorption Co-précipitation avec des oxydes métalliques | Sels de fer Oxy(hydroxy)des de fer d'aluminium, manganèse | Phosphates Compost facilement minéralisable |
| Chrome | Réduction du chrome IV en chrome III | Matière organique | Oxydes de manganèse Cendres volantes Hydroxyapatites Carbonate de calcium |
| Cuivre | Dépendant du pH et du rapport matière organique soluble/matière organique particulaire | Cendres volantes Certains alumino-silicates Minéraux argileux Certains composts Certaines boues de station d'épuration Mélanges matériaux alcalins-compost | Matière organique trop soluble Amendements ayant un pH trop élevé |
| Plomb | Échange ionique Précipitation | Phosphates | Matière organique trop soluble |
| Zinc | Échange cationique Complexation avec des ligands organiques | Phosphates Argiles Cendres volantes Certains alumino-silicates Matériaux alcalins | Amendements acidifiants |
| Cadmium | Dépendant du pH Sorption sur les oxy(hydroxy)des et les argiles | Chaux et autres matériaux alcalins Carbonates Oxydes de manganèse, oxy(hydroxy)des de fer | Amendements acidifiants |

Amendements biologiques

Les bactéries et les champignons mycorhiziens* ont la capacité de séquestrer les métaux et métalloïdes ou de les adsorber à leur surface, par des mécanismes actifs ou passifs. Ces microorganismes peuvent également produire des molécules capables de se lier avec les polluants. Par ces différents mécanismes, ils diminuent la mobilité des polluants.

Certaines bactéries sont à l'origine de réactions chimiques qui favorisent dans certaines conditions l'immobilisation de certains éléments traces.

En détails

Par exemple, l'arsenic peut être oxydé en As(V) par les bactéries. L'As(V) étant davantage retenu par les particules de sol que l'As(III), l'oxydation bactérienne aboutit à l'immobilisation de l'As. De même, la réduction du Cr(VI) en Cr(III) par les bactéries aboutit à l'immobilisation du Cr, le Cr(III) étant fortement lié aux particules de sol.

* *As* : arsenic ; *Cr* : chrome

En plus d'aider les plantes à absorber l'eau et les nutriments (phosphore en particulier), la symbiose mycorhizienne* peut augmenter la tolérance des plantes aux polluants en diminuant par exemple le transfert des polluants entre les racines et les parties aériennes des plantes. D'autres microorganismes peuvent jouer un rôle en phytostabilisation comme les bactéries endophytes* ou les actinomycètes* fixateurs d'azote.

De manière générale, ces microorganismes améliorent la colonisation des substrats pauvres par les plantes, enrichissent le sol en molécules nutritives et initient ou accélèrent la dynamique végétale.

Comme dans le cas des espèces végétales, il est préférable d'utiliser des microorganismes endogènes pré-adaptés aux conditions du sol à phytostabiliser (tolérance aux polluants et aux conditions pédo-agronomiques du sol).

Dans le cas où la phytostabilisation concerne une surface significative de sol, le choix des amendements est en grande partie contraint par leur disponibilité commerciale.

Pour en savoir plus

Kumpiene *et al.* (2008) ; Cheng and Hseu (2002) ; Roy *et al.* (2007) ; Wenzel (2009), Bolan *et al.* (2010) ; Kidd *et al.* (2009) ; Javaid (2011)

3.2.2 Étude de faisabilité technique et financière

La réussite de la phytostabilisation dépendra des choix des espèces végétales et des amendements mais aussi des potentialités du sol sur lequel ces espèces végétales vont être implantées (qualité du sol ; réserves en eau et en oxygène) et de facteurs pas toujours prévisibles comme les conditions climatiques, les attaques de ravageurs, les maladies, etc.

Pour s'assurer que les conditions du sol correspondent bien aux conditions de développement des espèces végétales sélectionnées, il sera nécessaire de réaliser un échantillonnage représentatif du sol et d'analyser les paramètres renseignant d'une part sur la qualité agronomique du sol (ex. : texture, pH et fertilité) et d'autre part sur la pollution. Dans certains cas, il pourra être préconisé de réaliser un essai *in situ* à petite échelle pour s'assurer de cette adéquation.

Pour en savoir plus

Guide traitabilité de l'ADEME (2009)

Pour réussir l'établissement et le maintien des cultures et pour obtenir le rendement attendu, il est recommandé de faire réaliser les travaux par des professionnels (agriculture, agro-foresterie, espaces verts).

Le coût lié à la mise en place de la phytostabilisation sur un site est très variable. Il dépend des conditions initiales du site qui vont conditionner les travaux à réaliser, de la surface du site, du diagnostic initial du site en termes de pollution, de l'incorporation ou non d'amendement,

du type et de la quantité d'amendement à incorporer et du type de végétation à planter. A cela, il faudra ajouter le coût lié à la protection éventuelle des cultures (gibiers, etc.), l'entretien de la culture, le coût de la récolte et son transport éventuel et les éventuels coûts ou bénéfiques liés à la valorisation de la biomasse (cf. Chapitre 2 Applicabilité). Il faudra également ajouter les coûts de la surveillance à réaliser pour vérifier l'efficacité de la phytostabilisation mise en place (évolution des concentrations dans le sol et dans les plantes).

Exemples de coûts de mise en place d'une phytostabilisation :

Les exemples présentés ici ont été mis en place dans le cadre de travaux de recherche mais permettent d'avoir une idée des ordres de grandeur des coûts de la mise en place d'une phytostabilisation. Les différentes étapes doivent être mises en œuvre au cas par cas en fonction de l'état initial du terrain, de la pollution présente et de l'usage futur retenu. Il est à noter que les coûts présentés ici ne prennent pas en compte les coûts liés aux études préalables pour définir le type de phytostabilisation à mettre en œuvre, la conduite du projet, les analyses physico-chimiques des sols avant la mise en place ainsi que les coûts d'exploitation ultérieurs.

Tableau 3.3 Exemples de coûts de mise en œuvre de phytostabilisation (sur une surface d'un hectare).

| Description des tâches effectuées | Situation 1 | Situation 2 | Situation 3 |
|--|-----------------|-----------------|----------------|
| Enlèvement et élimination de la végétation existante | | 5 400 € | |
| Nivelage et décompactage du sol | 4 800 € | 4 800 € | |
| Labour et passage d'une herse rotative | | | 400 € |
| Produits phytosanitaires | | | 150 € |
| Achat de l'amendement | 360 € | 360 € | |
| Épandage de l'amendement et incorporation au sol | 600 € | 600 € | |
| Achat des graines de canche | 4 550 € | 4 550 € | |
| Semis des graines de canche | 380 € | 380 € | |
| Achat de rhizomes de miscanthus et plantation | | | 4 000 € |
| Roulage de la canche ou du miscanthus | 350 € | 350 € | 350 € |
| Préparation du terrain et pose d'une bâche de paillage | | 3 500 € | |
| Achat des boutures de saule et plantation | | 5 000 € | |
| Total (sur un hectare) | 11 040 € | 29 940 € | 4 900 € |

Sources : Bourdon (2011) Bourdon (2011) Robinet (2009)

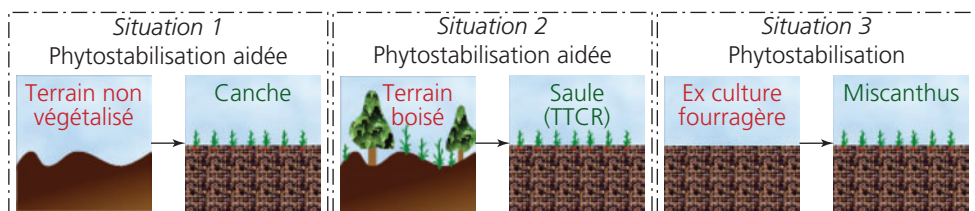


Figure 3.4 Description des trois exemples de situation de phytostabilisation (état initial / état d'arrivée).

3.2.3 Protocole et durée de mise en place

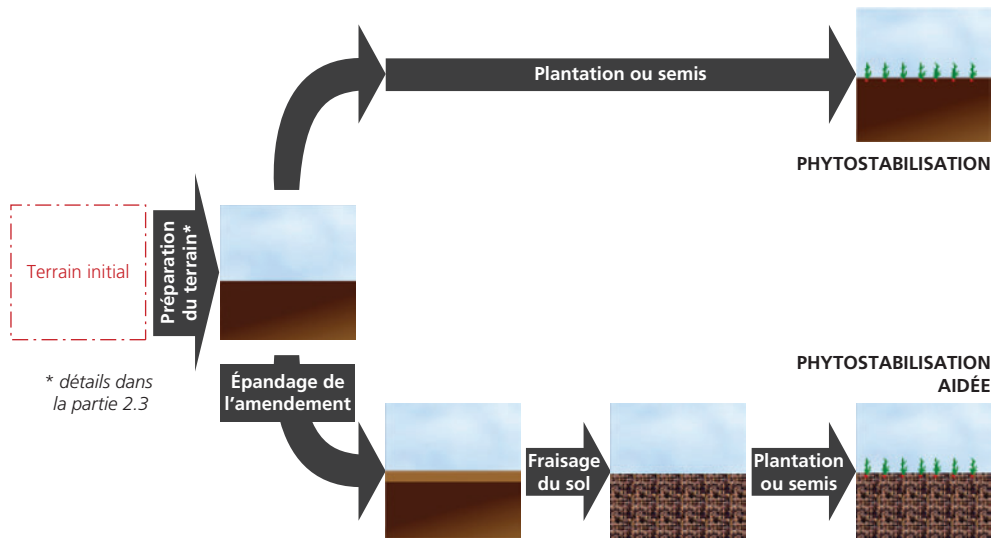


Figure 3.5 Protocole de mise en œuvre d'une phytostabilisation et d'une phytostabilisation aidée.

D'une manière générale, les itinéraires techniques envisagés correspondent aux itinéraires existants pour les cultures fourragères, grandes cultures, taillis à courte rotation (TCR) et très courte rotation (TTCR). De même, les engins et matériels utilisés sont identiques à ceux utilisés par les espaces verts, l'agriculture et la foresterie. Pour éviter de transporter des polluants hors du site, les travailleurs du chantier veilleront à utiliser des vêtements à usage unique ou dédiés au chantier. Pour éviter le contact direct avec les polluants du sol, le port de gants et de masque anti-poussière est conseillé.

La **durée effective des travaux de mise en place** de la phytostabilisation aidée sur un hectare varie entre une et trois semaines, selon le travail de préparation préalable de préparation du terrain.

En terme de **calendrier**, la mise en place de la phytostabilisation sur le site se calera de préférence sur les optimums de semis ou de plantations des boutures, plançons ou rhizomes. Pour les graminées, les semis se font généralement en septembre-octobre. Pour la plantation des rhizomes de miscanthus, la période la plus propice est mars-avril tout comme la plantation de boutures de saules. Les plançons de peupliers sont quant à eux plantés en fin d'automne-début d'hiver.

Pour en savoir plus
Nijskens (2007)

3.2.4 Évaluation de la performance

Parmi les paramètres décrits dans le paragraphe 2.5, l'évaluation de la performance d'une phytostabilisation nécessitera au minimum la mesure :

- du couvert végétal qui doit être de l'ordre de 100 % ;
- des transferts des éléments traces (ex. : plantes, sol, nappe) qui doivent être réduits à une valeur minimale.

D'autres paramètres pourront être évalués en fonction des objectifs de valorisation de la biomasse produite (ex. : rendement en biomasse).

La performance dépend, tout comme l'entretien, des objectifs de valorisation (économique ou écologique).

La phytostabilisation étant une solution a priori de gestion sur le long terme de sites et sols pollués, l'évaluation de l'efficacité des plantes et des éventuels amendements est à envisager de manière régulière. D'une manière générale, la fréquence du suivi est à adapter en fonction de la pollution, des risques et des objectifs de protection visés (ressource en eau, écosystème).

Pour en savoir plus

Bert *et al.* (2012) ; Tessier *et al.* (1979) ; Kumpiene *et al.* (2011) ; Ruttens *et al.* (2006) ; Nolan *et al.* (2005) ; Remon *et al.* (2005) ; Regyar *et al.* (2006)

3.2.5 Analyse des risques et surveillance

Comme toute technique de gestion des sites et sols pollués, une fois mise en place la phytostabilisation nécessite **une surveillance** pour vérifier les objectifs de qualité des milieux. Sa fréquence est à adapter à la pollution et aux risques.

En détails

Pour évaluer les effets positifs de la phytostabilisation, des indicateurs biologiques généraux et spécifiques, peuvent être utilisés. Pour évaluer les propriétés écotoxicologiques des sols, on peut citer par exemple les tests utilisant les bioessais normalisés suivants : tests utilisant des plantes (ISO 17126 : 2005 ; ISO 22030 : 2005) ou des vers de terre (ISO 17512-1 : 2008).

La surveillance nécessitera au minimum le suivi :

- de la **qualité du couvert végétal** : nombres d'espèces, occurrence, recouvrement du sol, teneur en éléments nutritifs (phosphore, potassium...) ;
- du **transfert résiduel des éléments traces** (ex. : plantes, sol) ;
- des **apports éventuels de éléments traces à la nappe et aux eaux de ruissellement**.

La surveillance pourra de plus comporter un suivi de **l'écosystème via l'étude de la biodiversité et de la fonctionnalité du sol**.

Pour en savoir plus

Rapport du projet PHYTOPERF (2012) ; Gimbert *et al.* (2008) ; Madejon et Lepp (2007) ; Dazy *et al.* (2008)

3.3 Applications

3.3.1 État de l'art

En Europe, trois-quarts des projets ont permis de tester des amendements en combinaison avec des plantes (phytostabilisation aidée). Des amendements de nature variée ont été testés, seuls ou en mélange (chaux, calcaire, compost, grenaille d'acier, zéolites, cendres volantes, boues rouges, oxydes de fer, fer zéro-valent, grenaille de fer, boues de papeteries, déchets de l'industrie betteravière et vinicole, charbon, bio-solides, dolomite, amendement sidérurgique, tourbe, apatites, etc.). Les espèces végétales testées étaient principalement des Poacées* (agrostide, pâturin, fétuque, ray-grass, canche, blé, orge, maïs, etc.) seules ou en mélange avec d'autres espèces herbacées, arbustives ou arborées (cytise, luzerne, lotier, bouleau, aulne, saule, peuplier, pin, etc.). Des légumes racines ou feuilles ont également été testés.

En l'absence de protocole standardisé, la démonstration de l'efficacité de la phytostabilisation s'est faite au cas par cas, en utilisant différentes méthodes, chimiques et biologiques, et approches (pot, lysimètre, parcelle) pour mesurer la réduction des transferts de polluants et leur mobilité.

La plupart des résultats de ces études démontrent le succès de la technique sur le temps qu'a duré l'essai (3-4 ans pour la plupart, > 10 ans pour quelques unes). Certaines études ont mis en évidence des effets non souhaités tels que l'immobilisation d'éléments essentiels pour la nutrition des plantes ou des modifications de structure du sol.

Finalement, en fonction de la typologie du sol et de la nature des polluants, les résultats montrent qu'il est, a priori, toujours possible de sélectionner un couple plante-amendement efficace pour une situation donnée. Les connaissances actuelles sur les plantes, les amendements et le retour d'expérience sur la mise en place de la phytostabilisation (aidée) laissent penser que cette technique n'est plus expérimentale et peut être déployée dans le cadre de projets d'aménagement au même titre que les techniques conventionnelles de gestion des sites et sols pollués.

3.3.2 Exemple 1

| Site de Salsigne | TYPE DE TRAITEMENT : PHYTOSTABILISATION AIDÉE | |
|--|---|--|
| <i>Usage envisagé du site</i> : Retour en espace naturel | <i>Durée prévue</i> : Long terme | |
| Nature de l'activité et pollution | | |
| <i>Société</i> : S.M.P.C.S. puis S.E.P.S. | | |
| <i>Type</i> : Flottation, pyrométallurgie et cyanuration | | |

| | | |
|--|---|--|
| <i>Lieu</i> : La Combe du Saut Lastours (11) | <i>Dates (ouv.-ferm.)</i> : 1992-2004 | |
| <i>Famille du polluant</i> : Métaalloïde, métaux | <i>Nom du polluant</i> : Arsenic | |
| <i>Concentration initiale</i> : - Sol 0,2 à 2,6 g/kg MS (après excavation de la couche superficielle de déchets et sols (Concentration initiale < 100 g/kg As)) - Eaux de ruissellement 9,4 mg/L (moyenne) | | |
| <i>Milieu(x) atteint(s)</i> : | <i>Etendue de la pollution</i> : | |
| - Sols - Eaux de surface - Eaux souterraines | - Déversement de 1,6 t/an d'arsenic dans la rivière Orbiel : érosion par ruissellement des eaux sur les sols (rejet direct) et percolation des eaux souterraines (cheminement vers la nappe *) (*) sur ce site la nappe est limitée à un écoulement superficiel | |
| <i>Risques/cibles</i> : Pas d'usage du site. Avec un sol phytostabilisé, la cible est principalement l'écosystème via les transferts par les sols, les eaux de ruissellement/de surface, les eaux d'infiltration, les poussières. | | |

| Réhabilitation | | |
|----------------|---|---|
| Acteurs | <i>Maître d'ouvrage</i> : ADEME | <i>Opérateurs</i> : IRH environnement (suivi) Université Hasselt (phytostabilisation) |
| | <i>Travaux</i> : | BEC Frères CAZAL SATAR |
| Objectifs | <i>Objectif</i> : Limitation des transferts de la pollution | <i>Teneur résiduelle</i> : Dans les eaux de ruissellement : 1 mg d'arsenic par litre |
| Phase pilote | - Une phase labo a permis de sélectionner l'amendement et les semences et de déterminer sur quel substrat l'ajout de l'amendement était nécessaire. - Une phase planche test a permis de vérifier la faisabilité (mélange au motoculteur et semis manuel). | |

Mise en œuvre

Prétraitement : L'amendement (grenaille de fer : ZZ156 Wheelabrator Alleward) a été épandu au semoir, avec un taux massique de 1 % et mélangé au sol sur 15 cm à l'aide d'un broyeur. Le sol a été ensuite compacté à l'aide d'un rouleau compacteur (sans vibration).



Épandage de l'amendement (à gauche) et ensemencement par hydroseeding (à droite)



Itinéraire technique culturel : Les semences utilisées sont :

| | | |
|--|---|--|
| 46 % de graminées <i>Agrostis capillaris</i> 6 %, <i>Arrhenatherum elatius</i> 12 %, <i>Dactylis glomerata</i> 18 %, <i>Festuca ovina</i> 5 %, <i>Holcus lanatus</i> 5 % | 32 % de légumineuses <i>Coronilla glauca</i> 3 %, <i>Lotus corniculatus</i> 5 %, <i>Melilotus alba</i> 7 %, <i>Medicago lupulina</i> 5 %, <i>Onobrychis sativa</i> 12 % | 22 % d'autres espèces <i>Daucus carota</i> 2 %, <i>Echium vulgare</i> 2 %, <i>Plantago lanceolata</i> 6 %, <i>Plantago coronopus</i> 3 %, <i>Sanguisorba minor</i> 9 % |
|--|---|--|

Gestion de la biomasse : n.c

Entretien : n.c

Contrôle :

| <i>Suivi</i> | <i>Paramètre étudié</i> |
|--|---|
| Évaluer la qualité du substrat | Paramètres pédologiques, agronomiques |
| Mesure de l'arsenic | Concentration, spéciation, mobilité, activité microbienne |
| Évaluer la qualité du couvert végétal | Couverture végétale, développement et évolution (recouvrement, diversité) ; facteurs limitants ; phytotoxicité |
| Évaluer le transfert résiduel vers le premier maillon de la chaîne alimentaire | Concentration du polluant dans les végétaux |
| Imager le fonctionnement de l'écosystème | Inventaire de la biodiversité végétale et animale Évaluation des transferts |
| Évaluer les transferts par infiltration | Bougies poreuses |
| Évaluer les transferts par les poussières | Tunnel à vent |
| Évaluer les apports par les eaux superficielles : ruissellement | Débitmètre et préleveurs automatiques Quantité et qualité des eaux superficielles (teneur en polluant dissous et particulaire) |

| | | | |
|----------------------|--|--|-----------------------------|
| Pollution résiduelle | <i>Teneur résiduelle :</i> | <i>Rendement effectif :</i> | <i>Durée surveillance :</i> |
| | <ul style="list-style-type: none"> – Moyenne : 1,5 mg/L d'arsenic – 50 % des évènements pluvieux produisent des eaux de ruissellement avec au maximum 1,0 mg/L d'arsenic total | Réduction de 85 % de la teneur en arsenic des eaux de ruissellement (résultant du programme global de réhabilitation du site par excavation et de la phytostabilisation) | 4 ans (première phase) |

Bilan prévisionnel

| | | |
|--------------------|---------------------------|----------------------|
| Coût | Traitement à la grenaille | 2 €/m ² |
| | Semis hydraulique | 0,5 €/m ² |
| Quantités traitées | 10 hectares | |

Retour d'expérience

Les suivis ont montré que plusieurs facteurs liés à la qualité du sol, à la méthode et au matériel utilisés pour la préparation du sol avant réalisation ont limité l'installation du couvert végétal : la battance du sol et sa faible capacité de rétention en eau et non pas le type de semences, les conditions climatiques ou la pollution résiduelle (pas de phytotoxicité). De plus, l'ajout de fertilisants a un effet positif sur la couverture végétale. Il est donc conseillé **de bien choisir les outils de mise en œuvre à l'échelle industrielle et de contrôler les paramètres agronomiques** avant réalisation.


Pour en savoir plus

| | | | | |
|----------|--|----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Contacts | <i>Société</i> | ADEME Midi Pyrénées | IRH environnement | Université Hasselt |
| | <i>Contact</i> | M. Patrick Jacquemin | Mme Jolanda Boisson | M. Jaco Vangronsveld |
| | <i>Tél.</i> | 33 (0)5 62 24 11 42 | 33 (0)5 34 42 27 70 | 32 (0)11 268 331 |
| | <i>Email</i> | patrick.jacquemin@ademe.fr | jolanda.boisson@irh.fr | jaco.vangronsveld@luc.ac.be |
| Sites | <i>Entreprises :</i> www.ademe.fr , http://www.groupeirhenvironnement.com , http://www.uhasselt.be/en | | | |
| | <i>Références :</i> www.difpolmine.org , http://extranet.groupeirhenvironnement.com/phytoperf/ , http://www.emse.fr/~bouchardon/recherche/phytoperf/phytoperf.htm | | | |


3.3.3 Exemple 2

| | | |
|---|--|--|
| Site de Fresnes sur Escault | Type de gestion : PHYTOSTABILISATION AIDÉE | |
| <i>Usage envisagé du site</i> : Exploitation de la biomasse en bois énergie | <i>Durée effective des travaux de mise en place</i> : 3 semaines | |

Nature de l'activité et pollution

| | | | |
|--|-------------------------------------|--|--|
| <i>Société</i> : Voies Navigables de France (VNF) | | <i>Lieu</i> : Fresnes sur Escault |  <p><i>Photo de Valérie Bert</i></p> |
| <i>Type</i> : Ancien terrain de dépôt de sédiments | | <i>Dates (ouv./ferm.)</i> : ... | |
| <i>Famille du polluant</i> : | <i>Nom du polluant</i> : | <i>Concentration initiale (mg · kg⁻¹ poids sec)</i> : | |
| Éléments traces | Cadmium Zinc Arsenic Plomb | 11 6900 44 912 | |
| <i>Milieu(x) atteint(s)</i> : Sédiments de surface | | <i>Étendue de la pollution</i> : 1 ha | |
| <i>Risques/cibles</i> : Inhalation de poussières, ingestion des plantes par les lapins, ingestion des lapins, ingestion de sol / cibles humaines | | | |

Réhabilitation

| | | | | |
|--------------|--|------------------------------|---|---|
| Acteurs | <i>Maître d'ouvrage</i> : VNF | <i>Opérateur</i> : INERIS |  | |
| Objectifs | <i>Objectif</i> : Étude de l'efficacité et de la pérennité de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse bois-énergie | | <i>Teneur résiduelle</i> : nc | <i>Délais</i> : 4 ans (2011-2014) |
| Phase pilote | <i>Description</i> : Étude de l'efficacité et de la pérennité de 2 amendements et de 2 espèces de graminées sur un essai pilote en plein champ (projet PHYTOSED, retour d'expérience sur 8 ans) | | <i>Résultats</i> : L'étude pilote a permis de sélectionner l'amendement minéral basique et la canche cespiteuse. | |

| | | | |
|----------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Mise en œuvre | <i>Prétraitement</i> : <u>En septembre 2011</u> : prise en charge de plante invasive, déboisement et défrichage, nivelage et décompactage du sédiment, épandage de l'amendement minéral basique (9 t/ha sur 25 cm), fraisage du sédiment, semis de la canche (<i>Barcampsia cespitosa</i>). <u>En mars 2012</u> : pose de bâche de paillage horticole après enlèvement de la canche et plantation manuelle de plants de saules (<i>S. viminalis</i> variétés Inger et tordis, densité 11500 plants/ha). | | |
| | <i>Itinéraire technique culturel</i> : Classique pour les graminées ; TTCR pour les saules (plants et non pas des boutures à cause de la durée du projet de recherche) ; pas d'utilisation de phytosanitaires | | |
| | <i>Gestion de la biomasse</i> : coupe en 2014 | | <i>Entretien</i> : nc |
| | <i>Contrôle</i> : Mesure des concentrations extractibles d'éléments traces dans le sédiment phytostabilisé vs non phytostabilisé ; mesure des concentrations dans les parties aériennes de la canche et des saules sur le sédiment phytostabilisé vs non phytostabilisé ; suivi du développement de la végétation colonisatrice (dénombrement, concentrations) et invasive (renouée du Japon), et du recouvrement de la canche ; mesure du rendement en biomasse des saules | | |
| Pollution résiduelle | <i>Teneur résiduelle</i> : nc | <i>Rendement effectif</i> : nc | <i>Durée surveillance</i> : 4 ans |

Bilan prévisionnel

| | |
|------------------|--------------------------------------|
| Coût | <i>Total (mise en place)</i> : 60 k€ |
| Quantités gérées | 1 ha |

Pour en savoir plus

| | | | | |
|----------|--|----------------|----------------|------------------------|
| Contacts | <i>Société</i> | INERIS | <i>Contact</i> | Valérie BERT |
| | <i>Téléphone</i> | 03 44 55 63 82 | <i>Email</i> | valerie.bert@ineris.fr |
| Sites | <i>Entreprises</i> : www.vnf.fr , www.ineris.fr | | | |

3.4 Questions/réponses

Est-il nécessaire d'utiliser des amendements ?

En général, en plus d'être des agents immobilisant les polluants, les amendements apportent des éléments qui participent à la nutrition des plantes. Sur des sols très pollués et peu fertiles, en l'absence d'amendement, seule une végétation clairsemée est capable de s'établir. Les amendements favorisent la survie, la colonisation et le développement des plantes et augmentent souvent le rendement de la culture. De plus, en hiver, les plantes, physiologiquement moins actives à cette période, jouent un rôle moins important dans l'immobilisation des polluants. Le rôle des amendements est alors essentiel.

À quelle fréquence faut-il remettre des amendements ?

En théorie, l'amendement est mis en une seule fois au moment de la mise en place de la phytostabilisation. En pratique, les expériences menées jusqu'alors sur différents amendements semblent confirmer cette hypothèse.

L'immobilisation des polluants dans les sols est-elle pérenne ?

Le retour d'expérience ne permet pas d'avoir des réponses pour tous les types d'amendements et toutes les situations. Le retour d'expérience sur les travaux menés jusqu'alors met en évidence une immobilisation des polluants sur au moins 10 ans.

Les amendements ne risquent-ils pas d'apporter des polluants en plus de ceux présents dans le sol ?

Certains amendements contiennent des éléments traces et des composés traces organiques. Les critères de qualité relatifs à l'innocuité des produits en terme d'éléments traces sont fixés règlementairement pour les produits homologués disponibles commercialement dans un contexte donné, souvent agricole. Ainsi, en fonction des normes, des concentrations maximales et des flux de polluants à ne pas dépasser sont à respecter (ex. : NFU 44-095, 2002 ; NF U 44-051, 2006 ; NF U 44-001 ; 2009).

Une parcelle phytostabilisée doit-elle être entretenue ?

Tout dépend de l'objectif visé par la mise en place de la phytostabilisation. Si l'objectif est d'augmenter ou de restaurer la biodiversité d'un site très perturbé par la pollution, il est préférable de laisser les plantes et les animaux s'installer le temps d'atteindre le niveau de biodiversité souhaité. Si l'objectif est d'exploiter une culture, il est préférable d'entretenir la culture pour obtenir le rendement souhaité.

Comment peut-on lutter contre la végétalisation, colonisatrice et issue de la banque de graines, dans le cas de la mise en place d'une culture ?

Le désherbage peut s'effectuer par passage d'une herse rotative, en utilisant un désherbeur thermique ou à l'aide de produits phytosanitaires.

Où se procurer les plants et les graines ?

Les graines de la plupart des plantes utilisables en phytostabilisation sont disponibles chez les semenciers.

Les boutures de saules ou les plançons de peupliers sont disponibles chez les pépiniéristes. Plusieurs sociétés en France et à l'étranger sont spécialisées dans la vente de rhizomes de miscanthus.

À partir de combien de temps, peut-on envisager une récolte pour un TTCR (taillis à très courte rotation) et quand doit-on renouveler les plants ?

La première récolte pour ce type de culture se fait dans la troisième année pour un TTCR, et après 6 ou 7 ans pour un TCR.

Pour les espèces ligneuses à croissance rapide (ex. : peuplier), le plant mère peut être maintenu sur une durée de 3 rotations de 7 ans en TCR ou de 7 rotations de 3 ans en TTCR pour une productivité optimale.

Le miscanthus n'est-il pas une espèce invasive ?

Le miscanthus est une *Poaceae*, originaire d'Asie du Sud-Est. Sa forte productivité en biomasse a conduit à son implantation et son étude dans le cadre des recherches sur les bioénergies. Le génotype utilisé pour la production de biomasse est *Miscanthus x giganteus* hybride entre deux espèces naturelles (*Miscanthus sinensis* et *Miscanthus sacchariflorus*). C'est une plante pérenne qui produit des rhizomes. Malgré des observations occasionnelles d'inflorescences, l'hybride *Miscanthus x giganteus* est stérile et se reproduit par bouturage du rhizome. Le miscanthus pourrait être une espèce invasive si comme la renouée du Japon il se multipliait via ses rhizomes de manière très importante, ce qui ne semble pas être le cas. Des études sont en cours pour confirmer le caractère non invasif de cette plante.

Pour en savoir plus
Schnitzler (2011)

Vj k'ri ci g'kpvkqpcmf 'igh'dic pm



Phytoextraction

4.1 Descriptif technique

4.1.1 Mécanisme

La phytoextraction est une technique *in situ* de dépollution fondée sur l'utilisation des plantes capables d'accumuler des polluants dans leurs parties aériennes.

Les plantes, via leurs racines, absorbent les polluants dans le sol et les **transfèrent dans leurs parties aériennes** (tiges, feuilles) où ils sont stockés.

L'efficacité de la phytoextraction repose sur la capacité des plantes à concentrer les polluants dans leurs parties aériennes et à produire une biomasse importante. Le produit de la concentration en polluants par la biomasse produite par unité de surface correspond au rendement d'extraction.

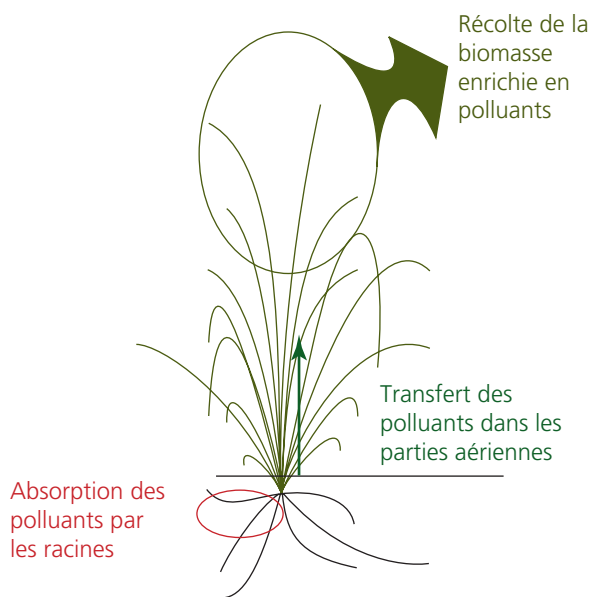


Figure 4.1 Schéma de fonctionnement de la phytoextraction.

Les plantes sont sélectionnées pour leur capacité à transférer et à stocker les polluants dans leurs parties aériennes (tiges et feuilles). La biomasse aérienne produite doit ensuite être récoltée afin de retirer définitivement du site les polluants extraits. Le traitement de cette biomasse enrichie en polluants fait l'objet de recherches (valorisation de la biomasse ou valorisation des polluants contenus dans la biomasse dans des procédés métallurgiques ou en biosynthèse).

En détails

Les plantes n'ont accès qu'à une partie des polluants dans le sol (la fraction dite « disponible ») et n'ont d'influence que sur la partie de sol colonisée par leurs racines. De ce fait, l'extraction des polluants par cette technique ne peut être que partielle. La plante la plus performante pour extraire les polluants du sol est une plante qui a un système racinaire dense et profond, un facteur de bioconcentration* supérieur à 1, un facteur de translocation* supérieur à 1 et un rendement en biomasse comparable à celui obtenu sur sol non pollué.

Pour en savoir plus

Vangronsveld *et al.* (2009) ; Bert *et al.* (2009) ; Mench *et al.* (2009) ; (Mench *et al.* (2010) ; Verbruggen *et al.* (2009)

4.1.2 Polluants traités

Les polluants susceptibles d'être extraits du sol par les plantes sont les **métaux** (par ex. : nickel, zinc, cadmium, etc.) et les **métalloïdes** (arsenic, etc.), regroupés sous la terminologie **d'éléments traces**.

Lors de la présence simultanée de polluants inorganiques et organiques, ces derniers peuvent être dégradés par les microorganismes rhizosphériques*, transférés dans les parties aériennes des plantes où ils peuvent être transformés (voir partie *phyto et rhizodégradation*), ou bien, libérés dans l'air (volatilisation).

4.2 Préconisations

4.2.1 Choix techniques

4.2.1.1 Choix des espèces végétales

Idéalement, les espèces végétales utilisables pour la phytoextraction doivent posséder les caractéristiques suivantes :

- **transfert significatif de polluants vers les parties aériennes ;**
- **croissance rapide et production de biomasse élevée ;**
- **résistance aux polluants présents** (nature et concentration) ;
- **facilement récoltables.**

Les espèces végétales peuvent être des plantes herbacées, des arbustes ou des arbres. Les espèces invasives sont à proscrire.

Les espèces végétales peuvent être :

- des « **hyperaccumulatrices** » de polluants, c'est-à-dire des plantes qui stockent dans leurs parties aériennes des concentrations de polluants au moins dix fois plus élevées que celles habituellement rencontrées dans des plantes se développant sur le même sol. Au regard des connaissances actuelles, ces plantes sont peu fréquentes dans le règne végétal. Etant donné que les espèces hyperaccumulatrices ne stockent en général qu'un seul élément trace, dans le cas de multipollution métallique, il peut être envisagé de sélectionner plusieurs espèces ayant des capacités de stockage complémentaires. À l'exception de quelques espèces, les hyperaccumulateurs sont des plantes à croissance lente et à plus faible biomasse que les espèces non hyperaccumulatrices ;
- des « **accumulatrices** » à **forte biomasse**, c'est-à-dire des plantes capables de produire une forte biomasse tout en stockant dans leurs parties aériennes des concentrations significatives de polluants (non hyperaccumulatrices). Il peut s'agir d'herbacées à croissance rapide utilisées en grande culture ou d'arbres à croissance rapide et dont le système racinaire est profond. Ces espèces ne stockent généralement pas plus de deux éléments traces dans leurs parties récoltables. Les arbres, en particulier, présentent une forte variabilité dans leur capacité de stockage des éléments traces.

Les plantes doivent être de préférence :

- **à cycle court ou pérenne** pour permettre plusieurs récoltes des parties aériennes enrichies en polluants dans l'année ;
- **des espèces locales**, adaptées aux conditions climatiques du site ;
- **non appétantes** (attractives) pour ne pas être mangées par les animaux herbivores, ceci afin d'empêcher le transfert des polluants dans la chaîne alimentaire.

Les espèces sont sélectionnées en fonction du (des) polluant(s) à traiter. Contrairement aux espèces à forte biomasse, et à l'exception de quelques espèces (ex. : *Alyssum murale*), les espèces hyperaccumulatrices étudiées jusqu'alors sont des espèces sauvages rarement commercialisées et pour lesquelles il n'existe généralement pas d'itinéraire technique pour leur culture ni d'équipement agricole pour leur récolte.

Quelques fournisseurs proposent de récolter sur demande certaines espèces hyperaccumulatrices dans leur milieu naturel.

Si un objectif de valorisation de la biomasse produite sur le site est envisagé, la sélection des espèces végétales sera alors contrainte par la filière envisagée.



Figure 4.2 *Noccea caerulea* (photo de Thibault Sterckeman).



Figure 4.3 *Alyssum murale* (photo de Guillaume Echevaria).

Quelques propositions de filières existantes ou en développement peuvent être proposées, au regard des connaissances actuelles sur la phytoextraction :

Tableau 4.1 Association des polluants avec des plantes pour la phytoextraction et leurs valorisations potentielles.

| Polluant | Espèces préconisées | Noms latins | Filières de valorisation |
|----------|--|---|---|
| Cadmium | Hyperaccumulateurs | <i>Thlaspi (Noccea) caerulescens</i> , <i>Arabidopsis halleri</i> | Co-combustion, gazéification, hydro-métallurgie |
| | Arbres et arbustes à croissance rapide et à forte biomasse | <i>Salix sp.</i> , <i>Populus sp.</i> | Bois-énergie, gazéification |
| | Herbacées à forte biomasse | <i>Zea maïs</i> , <i>Heliantus annus</i> , <i>Brassica napus</i> | Bioraffineries (biocarburants, etc.) |
| Zinc | Hyperaccumulateurs | <i>Thlaspi (Noccea) caerulescens</i> , <i>Arabidopsis halleri</i> | Co-combustion, gazéification, écomatériaux catalytiques et synthèse de biomolécules |
| | Arbres et arbustes à croissance rapide et à forte biomasse | <i>Salix sp.</i> , <i>Populus sp.</i> | Bois-énergie, gazéification |
| | Herbacées à forte biomasse | <i>Zea maïs</i> , <i>Heliantus annus</i> , <i>Brassica napus</i> | Bioraffineries (biocarburants, etc.) |
| Arsenic | Hyperaccumulateurs | <i>Pteris vittata</i> | Solvolyse |
| Nickel | Hyperaccumulateurs | <i>Alyssum murale</i> , <i>Alyssum corsicum</i> | Hydro-métallurgie, écomatériaux et synthèses d'agents thérapeutiques |
| Cuivre | Herbacées à forte biomasse | <i>Nicotiana tabacum</i> , <i>Heliantus annus</i> , <i>Brassica napus</i> | Hydro-métallurgie, solvolyse |
| Cobalt | Hyperaccumulateurs | <i>Alyssum murale</i> | - |

Pour en savoir plus

Bani *et al.* (2007) ; Chaney *et al.* (2007) ; Carrier *et al.* (2011) ; Keller *et al.* (2005) ; Grison *et al.* (2009) ; Syc *et al.* (2012) ; Van Ginneken *et al.* (2007) ; Vangronsveld *et al.* (2009) ; Mench *et al.* (2009) ; 2010)

4.2.1.2 Choix des amendements

Le rôle des amendements est d'augmenter le rendement de la phytoextraction (phytoextraction assistée) soit en rendant plus mobiles les métaux et métalloïdes dans le sol de façon à ce qu'ils soient absorbés par les racines des plantes puis transférés dans les parties aériennes de ces dernières, soit en augmentant la biomasse des plantes. L'augmentation du rendement de la phytoextraction peut être obtenue par incorporation d'amendements chimiques ou biologiques (engrais, agents chélatants, microorganismes, etc.).

Substances chimiques (agents chélatants, acides organiques, etc.)

Dans le cas de la phytoextraction assistée par des substances chimiques, des plantes non hyperaccumulatrices à fort taux de production de biomasse du type maïs ou colza sont de préférence utilisées. Cette approche permet d'extraire des métaux peu mobiles, comme le plomb, pour lesquels il n'existe pas d'hyperaccumulateur.

Pour **augmenter la fraction d'éléments traces facilement assimilable** par les plantes (éléments sous forme ionique, solubles ou échangeables), il est possible d'appliquer des agents chélatants ou des engrais acidifiant les sols (ex. : sulfate d'ammonium).

En détails

Les agents chélatants peuvent être du type :

- acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA) ; plus efficace que l'EDDS pour solubiliser le plomb et le cadmium ;
- acide diéthylène triamine pentaacétique (DTPA) ;
- acide nitrilotri-acétique (NTA) ; moins efficace que l'EDTA et l'EDDS ;
- acide éthylène-diamine-di-succinate (EDDS) ; plus efficace que l'EDTA pour solubiliser le cuivre et le zinc ;
- des acides organiques du type acide citrique ou acide oxalique ; moins efficaces que l'EDTA et l'EDDS.

Dans un objectif de phytoextraction, **ces produits chimiques ont essentiellement été testés en laboratoire**. L'augmentation des concentrations d'éléments traces dans les parties aériennes des plantes après application d'un agent chélatant ou d'un acide organique varie beaucoup d'une plante à l'autre et d'un métal à l'autre et dépend de la dose appliquée. Les mécanismes responsables de cette augmentation ne sont pas élucidés.

Pour **compenser les carences** dans les sols agricoles, des complexes d'EDTA et de métaux sont ajoutés dans les fertilisants. L'ensemble des produits est utilisé en arboriculture, en maraîchage, en horticulture, en viticulture, en pépinières et en grandes cultures. Certains de ces produits, les acides organiques en particulier, entrent dans la composition de produits phytosanitaires ou biocides. L'application se fait sur le sol, sur les feuilles et par incorporation dans les substrats.

En détails

Les chélates de fer d'EDTA sont utilisés pour prévenir et corriger la chlorose ferrique en sol acide et en culture hydroponique. Il existe également des produits composés de chélates variés tels que des mélanges d'oligo-éléments chélatés avec de l'EDTA et d'autres plus spécifiques : Zn+Mn-EDTA, Ca-EDTA, Cu-EDTA, Mg-EDTA, Mn-EDTA, Zn-EDTA et Fe-EDTA pour prévenir et corriger respectivement la carence en zinc+manganèse, calcium, cuivre, magnésium, manganèse, zinc et fer.

Bien que l'EDTA et ses sels ne soient pas mentionnés dans la liste des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau, cette substance a été retenue en 2008 parmi les substances soumises à révision pour leur possible identification comme substance prioritaire ou comme substance dangereuse prioritaire. En effet, l'EDTA forme des complexes très stables avec les métaux. Faiblement photodégradables et biodégradables, ces produits sont susceptibles d'être transportés dans l'environnement (en particulier vers les nappes par lessivage des complexes métaux-agents chélatants) et d'intégrer des compartiments de la chaîne alimentaire non souhaités. Bon nombre d'études ont mis en évidence la toxicité de ces produits sur les plantes, les microorganismes et les nématodes.

Il est préconisé d'utiliser des agents chélatants biodégradables se substituant à l'EDTA tels que l'EDDS, le NTA ou les acides citrique ou gluconique. À noter que le niveau de risque associé à l'utilisation du NTA ou d'autres agents chélateurs n'a pas fait l'objet d'un examen aussi approfondi que celle de l'EDTA. En Suisse et dans certains pays européens, l'utilisation au champ de l'EDTA et du NTA est interdite.

Pour en savoir plus

INERIS (2011) ; Araujo *et al.* (2010) ; Römkens *et al.* (2002) ; Evangelou *et al.* (2007) ; Luo *et al.* (2005) ; Barona *et al.* (2001) ; Mench *et al.* (2009 ; 2010) ; Wu *et al.* (2006)

Amendements biologiques

La phytoextraction peut être assistée par les bactéries et les champignons mycorrhiziens* (bioaugmentation). Certains microorganismes produisent des biosurfactants*, des sidérophores* ou des acides organiques qui augmentent la mobilité des éléments traces dans le sol et, par voie de conséquence, augmentent la concentration de ces éléments dans la plante. D'autres microorganismes agissent sur la biomasse des plantes en produisant, par exemple, des phytohormones qui vont faciliter leur croissance ou des antibiotiques qui vont inhiber les agents pathogènes.

Les microorganismes les plus étudiés sont les bactéries rhizosphériques* induisant la croissance des plantes (Plant growth-promoting rhizobacteria*, PGPR), les bactéries endophytiques* et les champignons mycorrhiziens*. La majorité des résultats disponibles est issue d'études de laboratoire dans lesquelles un inoculum* de microorganismes (culture pure ou co-culture) est injecté dans le sol proche des racines de la plante test ou dans lesquelles l'inoculation est réalisée par trempage ou par injection directe des microorganismes dans les racines ou dans les graines.

Les résultats de ces études sont assez contrastés. Certaines attestent l'effet positif de l'inoculation des microorganismes sur l'augmentation de la biomasse ou de l'absorption des éléments traces dans la plante. Au contraire, d'autres rapportent une réduction de l'absorption des éléments traces dans la plante ou aucun effet de l'inoculation sur la biomasse et l'absorption des éléments traces.

En détails

Par exemple, l'inoculation d'une espèce de saule avec le champignon ectomycorhizien* *Paxillus involutus* a augmenté la biomasse du saule (racines et parties aériennes) et la quantité de cadmium (22 %) et de zinc (48 %) stockée dans sa biomasse aérienne, par rapport au saule contrôle non inoculé. L'inoculation a également augmenté la concentration de cadmium extractible (NH_4NO_3) du sol de 1,22 fois par rapport au sol non inoculé.

Comme dans le cas des espèces végétales, il est préférable d'utiliser des microorganismes endogènes pré-adaptés aux conditions du sol à phytoextraire (tolérance aux polluants et aux conditions pédo-agronomiques du sol). En effet, la survie et la colonisation des microorganismes sont des facteurs clés conditionnant la réussite de l'inoculation.

Lorsque la phytoextraction concerne une surface significative de sol, le choix des amendements est en grande partie contraint par leur disponibilité commerciale et leur coût.

Pour en savoir plus

Wenzel (2009) ; Kidd *et al.* (2009) ; Lebeau *et al.* (2008) ; Baum *et al.* (2006) ; Vangronsveld *et al.* (2009) ; Mench *et al.* (2009)

4.2.2 Étude de faisabilité technique et financière

La **réussite de la phytoextraction** dépendra du choix des espèces végétales mais surtout des propriétés du sol (fertilité du sol, pH, capacité d'échange cationique*, réserves en eau et en oxygène, etc.) qui affectent directement la mobilité des polluants et leur possible transfert dans les parties aériennes des plantes. La réalisation d'un diagnostic de la pollution sur une profondeur d'environ 50 cm (zone moyenne accessible par les racines des plantes) ainsi qu'une caractérisation agronomique du sol permettra la sélection des plantes appropriées en fonction de la nature des polluants présents et en adéquation avec la typologie du sol. De ce diagnostic découlera la nécessité d'utiliser ou non un amendement pour augmenter la mobilité des polluants dans le sol ou le rendement en biomasse des plantes. Les facteurs environnementaux comme les conditions climatiques, les attaques de ravageurs, les maladies, etc. peuvent diminuer le rendement attendu en biomasse des plantes.

Pour réussir l'établissement et le maintien des cultures et pour obtenir le rendement attendu, il est recommandé de faire réaliser les travaux par des professionnels (agriculture, agroforesterie, espaces verts).

Pour en savoir plus

Robinson *et al.* (2003a ; 2003b ; 2006) ; Li *et al.* (2003)

En détails

Quelques modèles permettent d'estimer la durée nécessaire (en années) pour diminuer la concentration totale de polluant dans un sol. Cette durée varie en fonction des conditions du sol, des plantes utilisées, de la nature du polluant ciblé et de la concentration (ou quantité) résiduelle de polluant à atteindre. Il est à estimer au cas par cas. Un modèle permet d'estimer le coût de la phytoextraction en comparaison d'autres options. <http://www.kiwiscience.com/PhytoDSS/Phyto-DSS.html>

Le **coût dépend des conditions initiales** du site qui vont conditionner les travaux à réaliser, du diagnostic initial du site en termes de pollution, de la surface du site, de l'incorporation ou non d'amendement, du type et de la quantité d'amendement à incorporer et du type de végétation à planter. A cela, il faudra ajouter le coût lié à l'entretien de la culture, le coût de la récolte et son transport éventuel et les éventuels coûts ou bénéfices liés à la valorisation de la biomasse (cf. Chapitre 2 Applicabilité) ou des éléments traces contenus dans la biomasse. Il faudra également ajouter les coûts des analyses à réaliser pour vérifier l'efficacité de

la phytoextraction mise en place. A postes de dépenses équivalents, les exemples disponibles montrent que les coûts pour la mise en place de la phytoextraction sont similaires à ceux de la mise en place de la phytostabilisation.

Quelques études récentes présentent des éléments économiques ou des analyses coûts-bénéfices qui tiennent compte de la valorisation possible de la biomasse produite par phytoextraction.

Pour en savoir plus

Chaney *et al.* (2007) ; Thewys *et al.* (2008) ; Thewys *et al.* (2010a ; 2010b)

Exemple de mise en œuvre de la phytoextraction du zinc et du cadmium assistée par bioaugmentation sur un hectare, cas d'une plantation TCR de peupliers :

Tableau 4.2 Exemple de coûts pour la mise en œuvre d'une phytoextraction (sur une surface d'un hectare).

| Description | Coût |
|--|-----------------|
| Achat de peupliers | 4 500 € |
| Labour et passage d'une herse rotative | 400 € |
| Achat de l'inoculum* | 600 € |
| Produits phytosanitaires | 150 € |
| Plantation | 3 600 € |
| Protection gibier | 900 € |
| Entretien parcelle | 600 € |
| Total (sur un hectare) | 10 750 € |
| Source : | Bourdon (2011) |

4.2.3 Protocole et durée de mise en place

Lorsqu'il s'agit d'implanter des plantes à forte biomasse non hyperaccumulatrices, les itinéraires techniques envisagés correspondent aux itinéraires existants pour les cultures fourragères, grandes cultures, taillis à courte rotation (TCR) et très courte rotation (TTCR). Les engins et matériels utilisés sont identiques à ceux utilisés par les espaces verts, l'agriculture et la foresterie.

À l'exception de certaines espèces hyperaccumulatrices comme *Alyssum murale* pour laquelle l'itinéraire technique est connu, pour les espèces hyperaccumulatrices, il peut être envisagé d'utiliser les itinéraires techniques existants d'espèces proches. Par exemple, pour cultiver *Arabidopsis halleri*, l'itinéraire technique du colza pourra être envisagé.

Pour éviter de transporter des polluants hors du site, les travailleurs du chantier veilleront à utiliser des vêtements à usage unique ou dédiés au chantier. Pour éviter le contact direct avec les polluants du sol, le port de gants et de masque anti-poussière est conseillé.

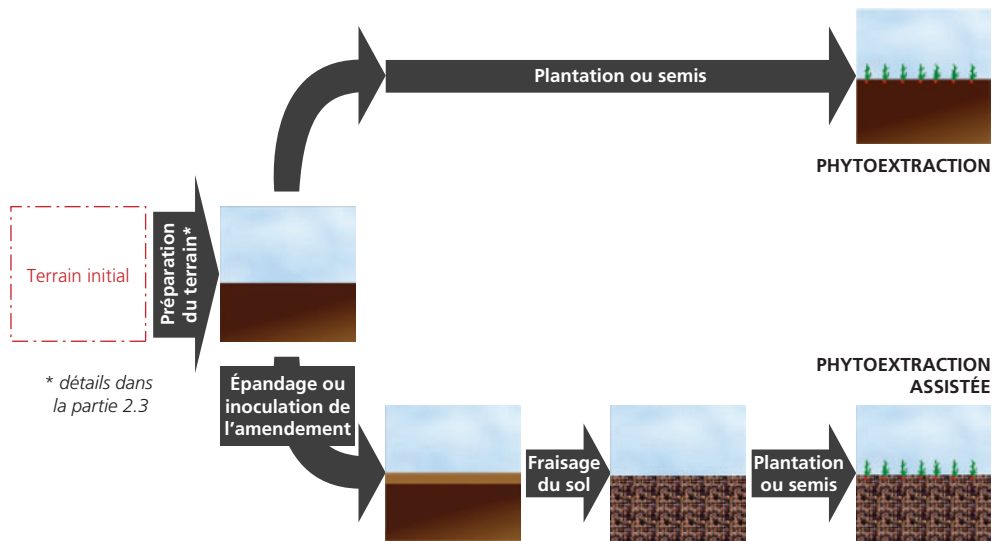


Figure 4.4 Protocole de mise en œuvre d'une phytoextraction (avec amendement ou non).

Dans le cas notamment des plantations de saules et de peupliers, des désherbages réguliers sont à envisager pour maîtriser la concurrence herbacée.

La **durée de mise en place** de la phytoextraction sur un hectare varie entre une et deux semaines.

En termes de **calendrier**, la mise en place de la phytoextraction sur le site se calera de préférence sur les optimums de semis ou de plantations des boutures ou plançons. Pour la plantation de boutures de saules, la période la plus propice est mars-avril. Les plançons de peupliers sont quant à eux plantés en fin d'automne-début d'hiver.

Pour en savoir plus

<http://www.peupliersdefrance.org/>

<http://www.salix-energie.fr/societe.htm>

4.2.4 Évaluation de la performance

Parmi les paramètres décrits dans le paragraphe 2-5, l'évaluation de la performance d'une phytoextraction nécessitera la mesure de :

- La **quantité d'éléments traces extraite** par la plante par unité de surface et de temps (*par ex. : en kg de métal/ha/an*).

À partir de la mesure des concentrations en éléments traces dans la plante (parties aériennes et racines) et le sol, plusieurs ratios peuvent être calculés :

- **Le facteur de translocation*** : ratio entre la concentration d'un élément trace dans les parties aériennes de la plante sur la concentration de ce même élément trace dans les racines de la plante.

- **Le facteur de bioconcentration*** : ratio entre la concentration d'un élément trace dans les parties aériennes de la plante sur la concentration totale de ce même élément trace dans le sol où se développe la plante. Ce facteur peut aussi se calculer à partir de la fraction dite « disponible » d'élément trace dans le sol.

En détails

La plante la plus performante pour extraire les polluants du sol est une plante qui a un système racinaire dense et profond, un facteur de bioconcentration* supérieur à 1, un facteur de translocation* supérieur à 1 et un rendement en biomasse comparable à celui obtenu sur sol non pollué.

La phytoextraction étant une solution de dépollution sur le long terme des sites et sols pollués, l'évaluation de l'efficacité des plantes et des amendements est à envisager de manière régulière. La fréquence du suivi dépendra de la fréquence des récoltes, de la pollution et des risques.

Pour en savoir plus

Lebeau *et al.* (2008) ; Mench *et al.* (2009, 2010) ; Vangronsveld *et al.* (2009)

4.2.5 Analyse des risques et surveillance

Comme toute technique de dépollution des sites et sols pollués, une fois mise en place, la phytoextraction nécessite un **suivi des risques et une surveillance**.

En détails

La phytoextraction doit impacter positivement les paramètres biologiques du sol voire aider à restaurer les fonctions du sol lorsqu'elles ont été perturbées ou inhibées par la pollution. La réduction de la toxicité des éléments traces sur les organismes du sol et leur activité est un élément important de la surveillance. Pour évaluer les propriétés écotoxicologiques des sols, on peut citer par exemple les tests utilisant les bioessais normalisés suivants : tests utilisant des plantes (ISO 17126 : 2005 ; ISO 22030 : 2005) ou des vers de terre (ISO 17512-1 : 2008).

Plusieurs paramètres sont à suivre :

- **Qualité du couvert végétal mis en place pour vérifier le rendement en biomasse et le rendement de phytoextraction attendu.**
- **Éléments nutritifs (calcium, magnésium, etc.) dans les parties aériennes des plantes** : En effet, les amendements chimiques peuvent parfois entraîner des carences en éléments nutritifs nécessaires au bon développement des espèces végétales. Des symptômes peuvent être visibles sur les plantes.
- **Transfert de produits (polluants ou chélatants) vers les eaux de surface ou souterraines** : Dans le cas de l'utilisation de chélatants peu biodégradables, il conviendra de vérifier que ces produits et les complexes de ces produits avec les éléments traces ne sont pas transportés vers les eaux de surface ou souterraines qu'ils pourraient polluer.
- **Concentrations en éléments traces dans les parties aériennes des plantes (végétation colonisatrice et issue de la banque de graines)** : Dans le cas où il n'y a pas de désherbage prévu, des espèces végétales autres que celle(s) sélectionnée(s) sont susceptibles de s'établir

sur le sol traité par phytoextraction. Il peut être opportun de mesurer les concentrations en éléments traces (en particulier cadmium et zinc) dans les parties aériennes des plantes les plus abondantes en fonction notamment de leur appétence pour les animaux herbivores.

4.3 Applications

4.3.1 État de l'art

La plante idéale pour la phytoextraction des éléments traces doit être tolérante aux concentrations d'éléments traces accumulés, accumuler les éléments traces dans les parties aériennes, avoir une croissance rapide, une biomasse importante et être facilement récoltable. Un protocole de phytoextraction possible est : culture des espèces de plantes appropriées sur le site pollué, fauchage de la biomasse récoltable enrichie en éléments traces et valorisation ou élimination de la biomasse récoltée. Deux approches sont possibles en phytoextraction : utilisation de plantes hyperaccumulatrices d'éléments traces ou de plantes à forte biomasse. Parmi les quarante sites répertoriés au niveau européen en 2010, moins de dix sites ont testé des plantes hyperaccumulatrices (*Noccea* [ex. *Thlaspi*] *caerulescens*, *Arabidopsis halleri*, *Alyssum murale*). Les autres plantes testées étaient principalement des arbres (différents genres et cultivars* de saules et peupliers) et des herbacées à forte biomasse du type tabac, tournesol, maïs, colza, sorgho, moutarde indienne, *Pelargonium*, etc.

En détails

Quelques essais encourageants ont été menés dans les années quatre vingt dix pour modifier génétiquement des plantes dans le but de les rendre plus efficaces en phytoextraction. Bien que les connaissances sur les gènes impliqués dans les mécanismes de tolérance et d'hyper(accumulation) aient énormément progressé ces dernières années, la production et l'utilisation de plantes ou de microorganismes génétiquement modifiés *in situ* n'est pas envisageable à moyen terme pour des raisons à la fois technique, réglementaire et d'opinion publique non favorable.

Une autre approche peut-être envisagée : la production de mutants non génétiquement modifiés obtenus par mutagenèse et sélection *in vitro*. Des expériences sont conduites depuis plusieurs années en Suisse, Belgique, France et Espagne notamment sur du tournesol et du tabac.

Pour en savoir plus

Nehnevajova *et al.* (2005 ; 2009) ; Herzig *et al.* (2007 ; 2008)

La plupart des essais ont été conduits sans ajout d'amendement. Le premier essai au champ mené avec un hyperaccumulateur date de 1991-1992 en Angleterre. Les résultats des études montrent une grande variabilité dans les performances des plantes en fonction des situations initiales (typologie du sol, nature des populations ou cultivars* de plantes) et suggèrent que ces performances pourraient être améliorées, voire contrôlées, par des traitements agronomiques adaptés et la sélection des meilleures plantes. Si le calcul des performances est effectué, non pas sur la base des concentrations totales d'éléments traces, mais sur la base de la fraction accessible par les plantes, alors le rendement d'extraction est meilleur et la durée du traitement est réduite. Cette approche pose néanmoins la question du rechargement possible de la fraction assimilable par les plantes et de la méthodologie à mettre en œuvre pour mesurer cette fraction.

En détails

T. caerulescens pouvait accumuler jusqu'à 8000 mg de Zinc par kg de plante sèche sur un sol contenant de 150 à 450 mg de Zn par kg de sol sec. Les calculs réalisés sur la base de ces chiffres suggéraient que la plante était capable d'extraire 40 kg de Zn par hectare en une seule fauche et que pour réduire la concentration totale de Zn de 440 à 300 mg · kg⁻¹, il faudrait réaliser 9 fauches. En condition naturelle, cette plante produirait 2,6 tonnes de biomasse à l'hectare, rendement qui peut être augmenté par fertilisation. Les calculs réalisés, à partir d'un rendement en biomasse de 5 t · ha⁻¹ et sur une zone d'extraction comprise entre 0 et 20 cms de profondeur, montrent que la plante pourrait réduire la concentration en Zn de 500 à 300 mg · kg⁻¹ en 35 fauches et celle en Cd de 5 à 3 mg · kg⁻¹ en 9 fauches.

*Zn : zinc ; Cd : cadmium

Pour en savoir plus

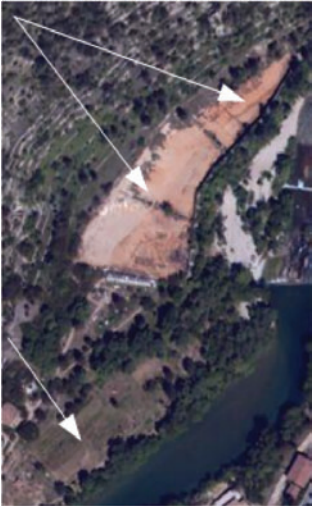
McGrath *et al.* (1993 ; 2006) ; Robinson *et al.* (1998) ; Zhao *et al.* (2003)

Lorsque des amendements ont été ajoutés, pour augmenter le rendement d'extraction et diminuer la durée d'extraction, il s'agissait de l'acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA), l'acide nitrilotri-acétique (NTA), le soufre élémentaire, l'acide citrique ou des engrais azotés, en combinaison avec des hyperaccumulateurs, des arbres et herbacées à forte biomasse.




Dans certains des cas testés, les amendements augmentent bien les concentrations d'éléments traces dans les parties aériennes des plantes. Cependant, ils augmentent aussi le lessivage des éléments traces vers les nappes. De plus, bon nombre d'études ont mis en évidence la toxicité de ces produits sur les plantes, les microorganismes et les nématodes*. Enfin, le gain de temps qui peut être obtenu à l'aide de ces amendements n'est pas confirmé dans bon nombre d'études. En conséquence, l'intérêt de l'utilisation des amendements par rapport aux effets secondaires avérés, n'est pas prouvé et elle est à démontrer au cas par cas.

Contrairement à la phytostabilisation (aidée), la phytoextraction est une technique émergente et dont l'application pratique en est à ses débuts. En effet, les connaissances actuelles sur les plantes, les amendements et leur efficacité, les mécanismes de rechargement de la fraction d'éléments traces disponible pour les plantes, la durée ainsi que le nombre restreint d'expériences conduites à une échelle significative et avec un recul suffisant ne permettent pas à ce stade d'envisager cette technique pour la dépollution.

4.3.2 Exemple

| | | |
|--|--|--|
| Site de Avinières | TYPE DE TRAITEMENT : PHYTOEXTRACTION ET PHYTOEXTRACTION ASSISTÉE | |
| <i>Usage envisagé du site</i> : Nouvelle filière verte | | <i>Durée prévue du traitement</i> : 5 à 8 ans |
| Nature de l'activité et pollution | | |
| <i>Société</i> : RECYLEX (ex-Metaleurop) | | |
| <i>Type</i> : Recyclage du zinc, du plomb et du plastique | | |
| <i>Lieu</i> : Saint-Laurent-Le-Minier (30) | <i>Dates (ouv.-ferm.)</i> : Les Avinières (ouv. 1872) - Les Malines (ferm. 1991) | Bassins de décantation : zones phytotoxiques adaptées au développement de cultures mixtes : <i>Noccaea caerulea</i> et <i>Anthyllis vulneraria</i> |
| <i>Famille des polluant</i> : Éléments traces métalliques | |  <p>Zones plates polluées favorables au développement de <i>N. caerulea</i></p> |
| <i>Nom des polluants</i> : Zinc Plomb Cadmium Arsenic | <i>Concentration initiale</i> : 73 000 ppm 20 475 ppm 1 300 ppm 1 090 ppm | |
| <i>Milieu(x) atteint(s)</i> : Sols, air, habitations, faune, flore, productions alimentaires (cultures maraîchères, miel), rivières | <i>Étendue de la pollution</i> : L'ensemble du site des Avinières, la Vis et au-delà sont pollués par l'érosion éolienne, le ravinement par les eaux de pluies, les crues de La Vis | |
| <i>Risques/cibles</i> : Cas de saturnisme – contamination de la chaîne trophique – étendue de la pollution à l'extérieur du site | | |

Réhabilitation

| | | | | |
|----------------------|--|---|--|--|
| Acteurs | <p><i>Maîtres d'ouvrage :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Commune de Saint-Laurent-Le-Minier - CEFE CNRS | <p><i>Opérateurs :</i></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div> <p>Et en collaboration avec Valorhiz, le CNRS, l'IRSTEA et l'ADEME</p>  | | |
| Objectifs | <p><i>Objectif :</i></p> <p>Réduire l'érosion éolienne, dépolluer partiellement et progressivement le sol, reconstruire une activité durable, dépolluante et compatible avec les contraintes du site.</p> | <p>Créer un site pilote exemplaire où restauration écologique et environnementale, reconstruction sociale et économique et valorisation du site sont complémentaires et en synergie.</p> | | |
| Phase pilote | <p>Étude du transfert d'échelle avec la société Valorhiz sur toutes les étapes du procédé (développement des cultures de microorganismes à grande échelle, développement de techniques automatisées des récoltes de semences et de biomasse, et de semis).</p> <p>=> Passage progressif de la phytoextraction expérimentale à une écologie industrielle</p> | | | |
| Mise en œuvre | <p><i>Prétraitement :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Arrosage permettant d'éviter la dispersion des poussières chargées en ETM - Mise en place d'un feutre géotextile protecteur - Amendement avec un compost naturel adapté <p><i>Itinéraire technique culturel :</i> Les semences utilisées sont des espèces tolérantes et hyperaccumulatrices d'ETM : <i>Thlaspi (Noccaea) caerulescens</i> et <i>Anthyllis vulneraria</i>.</p> <p><i>Gestion de la biomasse :</i> Récolte de la biomasse superficielle et valorisation en catalyse écologique et chimie verte (récupération des métaux)</p> <p><i>Entretien :</i> Régulier (développement d'une activité économique sous-tendue par la phytoextraction)</p> <p><i>Contrôle :</i> Dosages de sols, de produits alimentaires communaux avec un suivi rigoureux de la composition et de la distribution en ETM</p> | | | |
| Pollution résiduelle | <p><i>Teneur résiduelle :</i></p> <p>La phytoextraction est une technologie mise en place sur le long terme.</p> | <p><i>Rendement effectif :</i></p> <p>72 kg de zinc extrait par an sur une surface de 2,4 ha</p> | <p><i>Durée surveillance :</i></p> <p>Long terme</p> | |

Hygiène et sécurité

| | |
|-----------------------|--|
| Enjeux et contraintes | <p>Compte tenu des teneurs très élevées en ETM dans certains sols, toute manipulation du sol est précédée d'un arrosage. Le port de masques et de gants est recommandé à tous les acteurs.</p> <p>Les autorités locales et la population sont régulièrement informées des travaux réalisés dans le cadre des réunions annuelles de l'Agenda 21.</p> <p>La mairie est informée de chaque intervention réalisée sur le site.</p> |
|-----------------------|--|

Bilan prévisionnel

| | |
|--------------------|---|
| Coût | Ce programme très innovant doit déboucher sur la création d'une nouvelle filière verte à économie circulaire axée sur l'ingénierie verte au sens large (ingénierie écologique et chimique). Son objectif est d'apporter les financements nécessaires à une phytoextraction durable de l'ensemble du site. |
| Quantités traitées | 2,5 ha traités en phytoextraction |

Retour d'expérience

Les premières expériences constituent un encouragement au développement de la phytoextraction associée à la catalyse écologique et à la chimie verte. Ce procédé innovant de valorisation permet d'assurer une gestion rationnelle et utile de la biomasse et des déchets contaminés en contribuant activement au développement de la technique de phytoextraction.

La même expérience est développée sur les sites miniers de la Société Le Nickel (groupe ERAMET) en Nouvelle-Calédonie.

Pour en savoir plus

| | | | | |
|----------|---|------------------|--------------|----------------------------|
| Contacts | <i>Société</i> | CEFE CNRS | <i>Tél.</i> | 04 67 61 33 16 |
| | <i>Contact</i> | Pr Claude Grison | <i>Email</i> | claude.grison@cefe.cnrs.fr |
| Sites | <i>Entreprises</i> : www.valorhiz.com , www.sln.nc , www.iac.nc | | | |
| | <i>Références</i> : http://www.agence-nationale-recherche.fr/programmes-de-recherche/environnement-et-ressources-biologiques/ecotechnologies-ecoservices/fiche-projet-ecotech/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-11-ECOT-011 | | | |

4.4 Questions/réponses

Comment peut-on augmenter l'efficacité de la phytoextraction ?

Par des pratiques agricoles classiques (fertilisation, irrigation, etc.), la biomasse des plantes peut-être augmentée. Bon nombre d'espèces peuvent être récoltées plusieurs fois pendant la saison de culture, ce qui permet d'augmenter la quantité d'éléments traces extraite par an. Pour augmenter les chances de succès de la phytoextraction, il est préférable de choisir des espèces ayant un facteur de bioconcentration* proche de 1, démontrant ainsi une réelle capacité à transférer les éléments traces du sol vers leurs parties aériennes.

Quelle est la durée de la phytoextraction ?

Des calculs récents se basant sur une expérience en conditions réelles conduite en Belgique ont montré que pour diminuer la concentration en cadmium d'un sol agricole de 5 à 2 mg/kg, le temps nécessaire variait en fonction des espèces testées entre 58 et 234 ans. Les espèces testées étaient le maïs, le colza, le tournesol, le tabac, le peuplier et le saule. Les calculs ont été faits pour une profondeur de 25 cm pour les herbacées et une profondeur de 50 cm pour les arbres et suivant l'hypothèse que les plantes extrayaient la même quantité de cadmium chaque année.

Pour en savoir plus

Vangronsveld *et al.* (2009)

Ce temps devrait pouvoir être réduit à une vingtaine d'années avec l'utilisation de techniques de fertilisation appropriées et de clones ou cultivars* commerciaux. L'utilisation d'amendements chimiques ou biologiques devrait permettre d'augmenter l'efficacité de la phytoextraction et d'en diminuer sa durée. La durée de la phytoextraction, qui peut limiter son utilisation dans certaines situations, pourrait être compensée par la valorisation économique de la biomasse produite.

Une voie de progrès en vue de tenter de réduire ces durées réside dans la connaissance et l'amélioration de la culture des hyperaccumulateurs.

Pour en savoir plus

Ruttens *et al.* (2011)

Que faire avec la biomasse récoltée ?

Les voies de valorisation de cette biomasse enrichie en polluants sont à l'étude. Des essais sont conduits au travers de divers projets français et européens dans lesquels sont testés, entre autres procédés, la combustion, la pyrolyse, la gazéification, la solvolysse et la méthanisation. Pour les biomasses contenant des métaux ayant une forte valeur sur les marchés ou en voie de raréfaction (ex. : nickel, zinc), des procédés visant à la récupération de ces métaux dans la biomasse ont fait l'objet de brevets tandis que d'autres sont à l'étude (hydrométallurgie, catalyse écologique et chimie verte).

Pour en savoir plus

Projet PHYTOPOP ; Barbaroux *et al.* (2009, 2011, 2012) ; projet GREENLAND ; projet opportunité
fiche exemple

Comment gérer la colonisation par d'autres végétaux ?

Pour éviter l'établissement d'une végétation sur le sol, qui peut venir concurrencer la culture sélectionnée, il faut pratiquer un désherbage régulier manuel ou mécanique, par voie thermique ou chimique.



Phyto et rhizodégradation

5.1 Descriptif technique

5.1.1 Mécanisme

La phytoremédiation pour des polluants organiques est une technique de dépollution *in situ* des sols contaminés qui consiste à **dégrader des polluants organiques** en composés plus simples et moins toxiques **en utilisant des plantes et les microorganismes associés**.

Cette phytotechnologie peut se faire principalement selon deux modes :

- La **rhizodégradation** correspond à la dégradation des polluants organiques grâce à la stimulation de l'activité des microorganismes présents dans l'environnement des racines, la rhizosphère*. La plante fournit la source de carbone nécessaire à la croissance de la microflore rhizosphérique* (bactéries, champignons saprotrophes*) via son exsudation racinaire et permet l'aération du sol.
- La **phytodégradation** désigne la dégradation des polluants organiques dans la plante elle-même, à travers son activité métabolique, au niveau des parties aériennes et/ou racinaires (ce qui suppose alors l'absorption du polluant au préalable), ou en dehors de la plante via la production d'enzymes extraracinaires (exsudats).

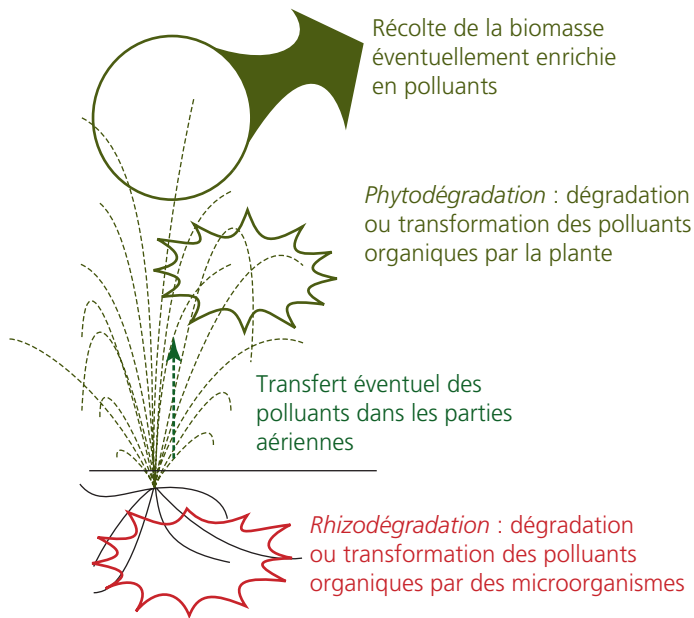


Figure 5.1 Schéma de fonctionnement de la phyto et rhizodégradation.

En détails

Les enzymes les plus fréquentes impliquées dans la biodégradation sont des déhalogénases, oxygénases, laccases, peroxydases, nitrilases, nitroréductases.

Cette technique est préconisée pour traiter de larges surfaces de sols faiblement contaminés à cause de la phytotoxicité des polluants. Elle s'applique principalement aux sols de subsurface (c'est-à-dire aux horizons de surface colonisés par les racines). Elle peut aussi être utilisée sur site sur des terres excavées, en complément d'autres techniques de remédiation ou dans une phase finale de revégétalisation. Il faut signaler que la phyto et rhizodégradation reste encore au stade de démonstration en France. Le nombre d'essais sur le terrain est limité (voir tableau d'essais français au chapitre 2).

Les principaux paramètres pouvant affecter la biodégradation des polluants organiques sont la fertilité du sol, en particulier sa structure, sa teneur en matière organique, son rapport carbone/azote et son pH, ainsi que la biodisponibilité* des polluants.

En détails

Les plantes agissent sur les polluants organiques en les absorbant et en les dégradant, mais aussi pour les polluants organiques faiblement absorbés en favorisant la croissance et l'activité des microorganismes qui les dégradent. Ce sont les bactéries et les champignons saprotrophes* qui ont plutôt été étudiés dans ce contexte. Mais les champignons mycorhiziens* peuvent aussi favoriser la rhizodégradation notamment en favorisant la survie et la croissance des plantes.

5.1.2 Polluants traités

Les **principaux polluants organiques** susceptibles d'être traités par les plantes sont (du plus étudié au moins étudié) : les HAP, les hydrocarbures totaux (HCT), les BTEX, les PCB, les solvants chlorés (dichloroéthane, trichloréthylène (TCE), tétrachlorométhane, trichlorométhane, hexachloroéthane, tétrachlorure de carbone, tétrachloroéthane), les pesticides (atrazine, DDT, aldrin, alachlor, ...), les explosifs (TNT, RDX). D'autres polluants organiques comme les polychlorodibenzo-p-dioxines (PCDD), les polychlorodibenzofuranes (PCDF), nitrobenzène, acide picrique, nitrotoluène, ... sont également considérés, mais il y a peu de retour d'expériences.

5.2 Préconisations

5.2.1 Choix techniques

5.2.1.1 Choix des espèces végétales

Comme pour toute technique de phytoremédiation, le choix des espèces végétales, qui peuvent être des plantes herbacées, des arbustes ou des arbres, est essentiel et doit être adapté au site et à sa pollution.

Les espèces végétales utilisées doivent être :

- **tolérantes au(x) polluant(s) et aux conditions environnementales du site** (caractéristiques agronomiques et pédologiques du sol, climat, évapotranspiration, ravageurs...) ;
- **capables de dégrader** (phytodégradation) ou **favoriser la biodégradation microbienne** (rhizodégradation) des polluants présents dans le sol ;
- **faciles à planter et à cultiver** (besoins limités en irrigation, fertilisants, protection phytosanitaire, fauchage ou élagage, ...) ;
- **productrices d'une biomasse importante** (densité racinaire, surface foliaire...).

L'utilisation de plusieurs espèces en polycultures peut être envisagée. La disponibilité commerciale des espèces et le coût de semences, ainsi que la filière de valorisation (voire d'élimination) envisagée pour la biomasse produite (Bois-énergie, compostage, éco-matériaux, méthanisation, biocarburants...) sont aussi des critères de sélection des espèces végétales. Dans certains cas, l'accumulation des polluants dans la partie aérienne nécessite un niveau de surveillance particulier et/ou une filière de valorisation ou d'élimination spécifique.

Plusieurs plantes, notamment les herbacées, les légumineuses ou certaines espèces ligneuses ont été décrites pour leur tolérance et leurs capacités à contribuer à diminuer la concentration des polluants organiques du sol :

Tableau 5.1 Association des polluants avec les plantes pour la phyto et rhizodégradation.

| Polluants organiques | Principales espèces préconisées | Noms latins des espèces préconisées |
|---|--|---|
| HCT, HAP, BTEX | – Luzerne, Ray-grass anglais, Trèfle, Miscanthus, Fétuque – Peuplier – Saule | – <i>Medicago Sativa</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Miscanthus giganteus</i> , <i>Festuca arundinacea</i> – <i>Populus berolinensis</i> , <i>P. deltoides</i> , <i>P. nigra</i> – <i>Salix alba</i> , <i>S. nigra</i> |
| PCB, PCDD, PCDF | – Luzerne, Trèfle, blé, Carex, Spartine | – <i>Medicago Sativa</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Triticum sp.</i> , <i>Carex aquatilis</i> , <i>Spartina pectinata</i> |
| Solvants chlorés (TCE hétérochloroéthane, ...) | – Saule – Peuplier | – <i>Salix nigra</i> – <i>Populus deltoides</i> , <i>P. trichocarpa</i> |
| Pesticides (atrazine, DDT, alachlor, ...) | – Luzerne, Maïs, Pois, Trèfle | – <i>Medicago Sativa</i> , <i>Zea mays</i> , <i>Pisum sativum</i> , <i>Trifolium pratense</i> |
| Explosifs (TNT, RDX, ...) | – Blé, Papyrus – Peuplier | – <i>Triticum aestivum</i> , <i>Cyperus esculentus</i> – <i>Populus deltoides</i> , <i>P. nigra</i> |

Il est cependant souhaitable de privilégier des espèces natives, mieux adaptées aux conditions environnementales. Dans certains cas, c'est la végétation colonisatrice se développant sur le site qui est privilégiée.

Pour en savoir plus

Green & Hoffnagle (2004) ; Pilon-Smits (2005) ; Wessels Perelo (2010)

5.2.1.2 Choix des amendements

Les amendements utilisés dans les programmes de phytoremédiation des polluants organiques ont pour but de faciliter l'installation des plantes et leur pérennisation par des intrants chimiques ou organiques, notamment pour les sols pauvres. Par ailleurs, il est possible d'améliorer la capacité de dégradation des plantes par l'introduction d'agents biologiques. Ces microorganismes bactériens ou fongiques sont impliqués directement dans la dégradation des polluants ou indirectement en favorisant le développement et la résistance des plantes.

Amendements chimiques ou organiques

Étant donné que les sols anthropisés* présentent généralement des teneurs insuffisantes en éléments nutritifs, des **apports en azote, phosphore et potassium** sont souvent préconisés pour permettre d'accélérer les vitesses de dégradation des polluants organiques par la flore microbienne tellurique (biostimulation). Dans le même objectif, **l'ajout d'engrais organiques** permet une libération plus lente des nutriments en fonction des cinétiques de minéralisation tout en améliorant la structure des sols, leur aération et leur réserve hydrique. Plus généralement, un apport en macronutriments permet de limiter les phénomènes de compétition qui pourraient avoir lieu entre la plante et les micro-organismes.

La biodisponibilité* des polluants étant un paramètre essentiel à leur dégradation, un apport de surfactants*, chimique (Triton X100, SDS...) ou biologique (rhamnolipides...), peut être parfois utilisé pour rendre les polluants plus biodisponibles*.

Amendements biologiques

Les amendements biologiques contiennent des microorganismes qui ont pour fonction de favoriser :

- **La dégradation des polluants** : La microflore dégradante peut être absente ou sa densité insuffisante, il est donc parfois nécessaire d'apporter des microorganismes pré-sélectionnés pour leur capacité métabolique (bioaugmentation).
- **La croissance et la résistance des plantes** : Ils sont symbiotiques et peuvent être des champignons mycorhiziens*, des bactéries endophytes* ou des bactéries PGPR*. L'utilisation d'inocula mycorhiziens* peut être indiquée en complément d'une technique de phytoremédiation car ils peuvent augmenter le prélèvement des nutriments et de l'eau par les plantes et leur capacité à tolérer les conditions défavorables et favoriser la biodégradation de certains polluants.

En détails

L'effet positif de l'inoculation de la luzerne par *Rhizobium meliloti* a été démontré dans le cadre de la phytoremédiation de sols contaminés par les HAP (Teng *et al.*, 2011).

Comme dans le cas de la bioremédiation*, les techniques de biostimulation et de bioaugmentation peuvent être utilisées chacune seule ou associées pour améliorer la biodégradation assistée par les plantes.

Pour en savoir plus

Green et Hoffnagle (2004) ; Leyval *et al.* (2002) ; McGuinness & Dowling D. (2009) ; Glick (2010) ; Bertrand *et al.* (2011)

5.2.2 Étude de faisabilité technique et financière

Comme cela est précisé dans la partie « choix techniques », la **faisabilité** d'une telle technique dépend d'une part de la **bonne implantation d'une espèce végétale** adaptée aux polluants à traiter (fertilité du sol, seuil de toxicité des polluants, conditions pédo-climatiques) et d'autre part de la **biodisponibilité* des polluants** pour les microorganismes dégradants ou pour le prélèvement racinaire.

Plusieurs éléments doivent donc être évalués :

- La **fertilité du sol** devra être évaluée sur des échantillons de sol représentatifs du site par une analyse agronomique mettant en œuvre des tests normalisés renseignant en particulier sur la texture, le pH, le carbone, les éléments échangeables (bases échangeables, capacité d'échange cationique*) et les macronutriments (azote, phosphore disponible).
- La **toxicité des polluants** présents doit être évaluée ; les tests doivent se porter sur les polluants cibles du traitement mais aussi les co-contaminants. Il n'y a pas aujourd'hui de

technique normalisée mais des protocoles d'extraction chimique s'inspirant de ceux utilisés pour les éléments minéraux (extractions à l'eau ou par des solvants doux, extractions via des phases solides (résine Tenax[®], cyclodextrine) sont disponibles. Une évaluation est également possible via certains tests biologiques normalisés :

- biodégradabilité,
 - qualité du sol – croissance plante ; élongation racinaire de l'orge (*H. vulgare*) ISO 11269-1 (1993),
 - qualité du sol – survie et reproduction du ver de terre ; *E. fetida*, ISO 11268-1 (1993), ISO 11268-2 (1998),
 - qualité du sol – survie et reproduction du collembole ; *F. candida*, ISO 11267 (1999), ISO 11267 (1999),
 - qualité du sol : effets des polluants vis à vis des escargots juvéniles - détermination des effets sur la croissance par contamination du sol ; Helicidae, ISO 15 952 (2006).
- La biodisponibilité des polluants sera évaluée à l'aide de tests biologiques : bioindicateurs d'accumulation et/ou bioindicateurs d'impact (biomarqueurs d'effet) :
- qualité du sol : effets des sols contaminés sur la composition en acides gras foliaires, *Lactuca Sativa*, X 31-233 (2012),
 - qualité du sol - Biotest végétal pour l'évaluation de la biodisponibilité environnementale des éléments traces pour les plantes, ISO/CD 16 198 (2012).

Les **coûts** de mise en place et de suivi du traitement dépendent fortement du site (état initial, surface), du choix d'espèce (annuelle ou vivace ; herbacée ou ligneuse ; semis direct ou repiquage), de la durée estimée de traitement, de l'apport d'amendements. Les coûts d'entretien et de récoltes doivent aussi être considérés comme les éventuels coûts ou bénéfices liés à la valorisation de la biomasse (cf. Chapitre 2). Enfin, l'efficacité du traitement et son innocuité pour l'environnement (en particulier la non-dissémination des polluants) nécessitent un suivi analytique, également à budgétiser.

5.2.3 **Protocole et durée de mise en place**

La culture dans un but de rhizo- et phytodégradation doit être envisagée de manière analogue à celle à vocation agricole avec un itinéraire technique correspondant à ceux existant et adapté à l'espèce envisagée : culture fourragère, grande culture, taillis à courte rotation (TCR) ou très courte rotation (TTCR). Les variantes entre les sites dépendront alors essentiellement de l'état initial du sol, de la nature du couvert préexistant, de la localisation de la contamination (nécessité d'excavation et/ou d'homogénéisation) et de l'apport d'amendements. On peut ainsi reprendre les étapes telles que décrites dans le chapitre 2.

Comme pour toute culture, les étapes préalables de préparation du sol s'effectueront dans un délai permettant l'implantation du couvert végétal à la période adaptée et climatiquement la plus favorable à l'espèce sélectionnée.

Pour les graminées, les semis se font généralement en septembre-octobre. Pour la plantation de boutures de saules, la période la plus propice est mars-avril. Les plançons de peupliers sont quant à eux plantés en fin d'automne-début d'hiver.

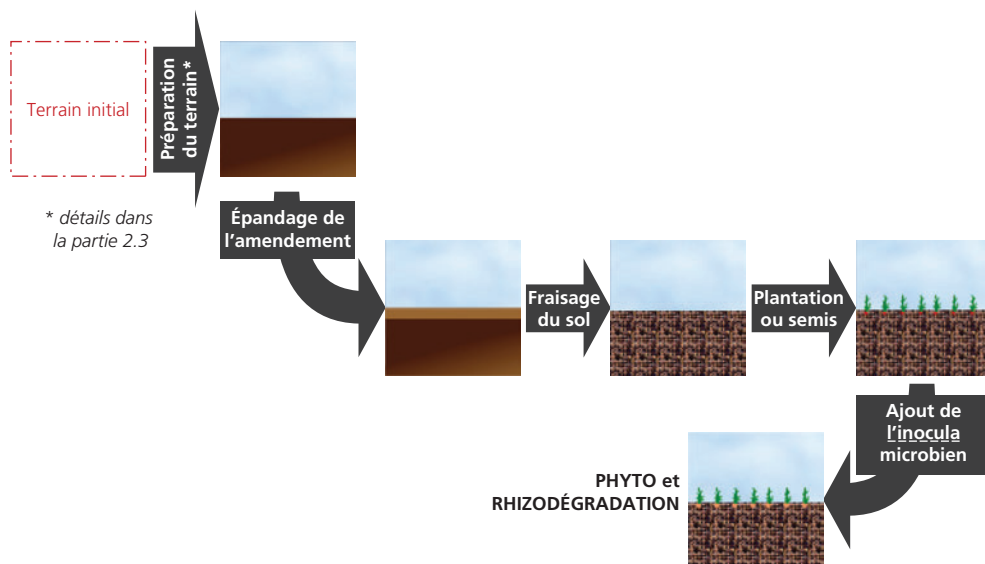


Figure 5.2 Protocole de mise en œuvre d'une phyto et rhizodégradation.

5.2.4 Évaluation de la performance

Les paramètres à évaluer, communs à toute phytotechnologie, sont décrits dans la partie 2.5. Les paramètres ci-dessous sont à suivre lors de l'utilisation de la phyto et rhizodégradation :

- Les **concentrations en polluant et en molécules issues de sa dégradation** dans les plantes.
- La **fraction biodisponible*** de polluant dans le sol.

Enfin, suivant le cahier des charges initialement défini, des objectifs en termes d'**impact sur l'environnement** peuvent également être à respecter. Il s'agit alors de vérifier que le traitement mis en place n'a pas eu d'effets négatifs sur les compartiments environnementaux proches (nappe, eaux superficielles, cultures avoisinantes etc.).

5.2.5 Analyse des risques et surveillance

Pendant et après la mise en œuvre d'un procédé de phytoremédiation d'un sol contaminé par les polluants organiques, il est nécessaire d'évaluer les risques résiduels grâce à la surveillance et au suivi des paramètres suivants :

- **les teneurs en polluants dans les sols.** Afin d'obtenir la fraction biodisponible* du polluant et des molécules issues de sa dégradation, l'analyse physico-chimique des teneurs résiduelles par extraction complète des polluants dans les échantillons de sols doit être complétée par des analyses avec des techniques d'extraction des fractions disponibles ;
- **les teneurs en polluants et en molécules issues de sa dégradation dans les milieux de transfert** (essentiellement les eaux souterraines) ;

- **la qualité agronomique des sols** : pH, taux de matière organique, ... ;
- **les concentrations en polluants et en molécules issues de sa dégradation dans les plantes** : paramètres relatifs aux filières de traitement ultérieur (accumulation dans les parties aériennes) ;
- **l'écotoxicité** : Afin d'évaluer précisément le risque représenté par les polluants des sols, notamment via les effets d'interaction entre polluants, il est nécessaire de mesurer leurs effets biologiques et écotoxicologiques.

En détails

La caractérisation en laboratoire du risque écotoxique des sols contaminés requiert deux approches complémentaires : l'étude écotoxicologique des échantillons solides d'une part et celle de leurs extraits aqueux d'autre part. Parmi les différents essais d'écotoxicité appliqués aux sols pollués, normalisés au niveau national et international, et qui concernent des organismes aquatiques et terrestres (M. Bonnard, 2010), on peut citer le test sur les microalgues (AFNOR NF T90-375, 1998) sur les solutions, le test de génotoxicité sur *Vicia faba* (AFNORT90-327, 2004) et le test Microtox sur bactéries (*V. fischeri*) (AFNOR NF ENISO 11348-3 (1999)).

Pour en savoir plus

ADEME (2002) ; Jauzein *et al.* (1999) ; Bonnard (2010) ; Semple *et al.* (2003) ; Reid *et al.* (2000)

5.3 Applications

5.3.1 État de l'art

Les essais effectués en Europe avaient pour objectif de mesurer l'impact de la végétation sur la dégradation des polluants organiques présents dans le sol par comparaison avec le même sol non végétalisé. Par analogie avec la phytoextraction, l'absorption des polluants organiques est limitée par leur pénétration dans la plante. Elle dépend des propriétés et de la biodisponibilité* des polluants organiques, de la taille et de la structure du système racinaire des plantes et de leur taux d'évapotranspiration. Les polluants organiques sont souvent hydrophobes et fortement adsorbés aux particules de sol ce qui ne facilite pas leur pénétration dans les plantes. Les plantes peuvent libérer des enzymes qui vont dégrader certains polluants organiques et modifier leur micro-environnement via la libération de molécules qui vont permettre la prolifération de certains microorganismes capables de dégrader les polluants organiques. Lorsque les polluants organiques sont très hydrophobes, les microorganismes bactériens et fongiques jouent un rôle de premier ordre par rapport aux plantes dans la dégradation. Certains composés peu hydrophobes (ex. : trichloroéthylène [TCE]) peuvent entrer via le xylème dans la plante et y être métabolisés (ex. : trichloroéthane) ou être libérés par évapotranspiration par les feuilles avec ou sans transformation (ex. : éthylbenzène et xylène [BTEX], TCE). Quelques essais *in situ* récents sur le peuplier montrent que cette limitation pourrait être circonscrite à l'aide de bactéries endophytes* capables de coloniser le xylème et de dégrader les polluants avant qu'ils ne soient libérés dans l'atmosphère. Avec ce type de polluants organiques, le suivi des performances par bilan de masse comme réalisé avec les éléments traces est difficile, notamment à cause de l'absence



de contrôle des transferts vers l'atmosphère. Les polluants testés *in situ* sont : BTEX, TCE, PCB, TNT et HAP.

Comme la phytoextraction, la phyto-rhizodégradation est encore émergente. Des questions se posent encore concernant les mécanismes d'absorption et de translocation des polluants organiques dans les plantes. La libération de certains polluants organiques ou de leurs métabolites doit être contrôlée pour éviter leur libération dans l'atmosphère. L'inoculation* de micro-organismes rhizosphériques* ou endophytiques *in situ* comme la connaissance des mécanismes qui pourraient favoriser la biodisponibilité* des polluants organiques persistants sont des voies de recherche qui devraient permettre d'avancer dans l'applicabilité de cette technique.

Pour en savoir plus

Weyens *et al.* (2009a ; 2009b)

5.3.2 Exemple

| Site de Homécourt (GISFI) | TYPE DE TRAITEMENT : RHIZODÉGRADATION – ATTENUATION NATURELLE ASSISTÉE | |
|--|---|--|
| <i>Usage envisagé du site</i> : Plate-forme expérimentale, site d'observation | <i>Durée prévue</i> : Long terme (> 5 ans) | |
| Nature de l'activité et pollution | | |
| <i>Société</i> : Bail Industries | | <i>Site expérimental du GISFI à Homécourt dédié à l'étude des sites et sols dégradés</i>  |
| <i>Type</i> : Acierie | | |
| <i>Lieu</i> : Neuves-Maison (54) | <i>Dates (ouv.-ferm.)</i> : Premier haut fourneau en 1874, ouv. aciérie en 1902, encore en activité partielle | |
| <i>Famille du polluant</i> : Hydrocarbures aromatiques polycycliques Éléments traces métalliques | | |
| <i>Nom du polluant</i> : | <i>Concentration initiale</i> : | |
| 16 HAP | 1800 à 2000 mg · kg ⁻¹ | |
| Zinc | 2700 mg · kg ⁻¹ | |
| Plomb | 680 mg · kg ⁻¹ | |
| Chrome | 372 mg · kg ⁻¹ | |
| <i>Milieu(x) atteint(s)</i> : | <i>Étendue de la pollution</i> : | |
| Sols | L'étendue de la pollution est limitée au dispositif expérimental mis en place. | |
| Faune | | |
| Flore | | |
| <i>Risques / cibles</i> : Contamination de la chaîne trophique | | |
| | |  <i>Parcelles lysimétriques mises en place en 2005</i> |

Réhabilitation

| | | | |
|----------------------|--|--|--|
| Acteurs | <p><i>Maître d'ouvrage :</i></p>  | <p><i>Opérateurs :</i></p> <p>LIMOS UMR 7137 CNRS Univ Lorraine LSE UMR 1120 INRA Univ Lorraine G2R UMR 7566 CNRS Univ Lorraine LIEBE UMR 7146 CNRS – Univ Lorraine GMGM UMR CNRS – Univ. Strasbourg</p> |    |
| Objectifs | <p><i>Objectif :</i></p> <p>Étudier le devenir et l'impact environnemental de la multipollution d'un sol en présence et en absence de plantes</p> | | <p><i>Teneur résiduelle :</i></p> <p>Créer un site d'étude sur le long terme avec une approche intégrée et multidisciplinaire de l'atténuation naturelle et de la rhizodégradation</p> |
| Mise en œuvre | <p><i>Prétraitement :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Mise en place des parcelles lysimétriques de terre contaminée - Mise en place des traitements (végétation, inoculation) : parcelles nues, plantées de luzerne, plantées avec une plante hyperaccumulatrice de métaux, plantées de luzerne et mycorhizées*, parcelles de végétation colonisatrice - Fertilisation minérale lors de la mise en place <p><i>Gestion du site et itinéraire technique culturel :</i> Prélèvements et analyses d'échantillons de sol, eau, faune, flore deux fois par an (printemps, automne), et récolte de la biomasse à l'automne</p> <p><i>Entretien :</i> Désherbage, contrôle et prélèvement des solutions</p> <p><i>Contrôle :</i> Dosages de sols, de produits alimentaires communaux (hors parcelle) avec un suivi rigoureux de la composition et de la distribution en ETM</p> | | |
| Pollution résiduelle | <p><i>Teneur résiduelle :</i></p> <p>Après 7 ans, 900 à 1200 mg · kg⁻¹ HAP</p> | | <p><i>Durée surveillance :</i></p> <p>Long terme</p> |

Hygiène et sécurité

| | |
|-----------------------|---|
| Enjeux et contraintes | <p>Compte tenu de la contamination, le site expérimental est sous accès surveillé, est clos et grillagé, et sous la surveillance de deux agents du GISFI. Pour la manipulation de terre contaminée, le port de masques et de gants est recommandé à tous les acteurs.</p> |
|-----------------------|---|

Bilan prévisionnel

| | |
|--------------------|---|
| Quantités traitées | 150 m ² (parcelles expérimentales) |
|--------------------|---|

Retour d'expérience

Le suivi sur le long terme (7 ans) des parcelles mises en place montre une diminution lente de la teneur en polluants organiques (HAP) dans le sol. Cette évolution lente, qui n'est pas influencée significativement par la présence d'une végétation, est à relier avec la faible disponibilité des polluants (contamination ancienne), et suggère un risque faible pour l'environnement. Toutefois, le suivi écotoxicologique montre une toxicité des effluents (tests sur les céridaphnies et les microalques) qui est plus faible pour les parcelles plantées. On note aussi une évolution de la diversité biologique, qui augmente puis se stabilise dans le sol pollué, indiquant la création de nouveaux biotopes et qui est fortement structurée par la présence de végétation, naturelle ou introduite.

Pour en savoir plus

| | | | | |
|----------|--|---------------------------------|--------------|---------------------------------|
| Contacts | <i>Société</i> | LIMOS UMR CNRS Univ Lorraine | <i>Tél.</i> | 03 83 68 42 82, 06 73 68 67 39 |
| | <i>Contact</i> | Dr Corinne LEYVAL | <i>Email</i> | corinne.leyval@univ-lorraine.fr |
| Sites | <i>Référence</i> : http://www.gisfi.fr | | | |

5.4 Questions/réponses

Où se procurer les inocula* microbiens (mycorrhiziens*, bactériens, fongiques) et sous quelles formes sont-ils commercialisés ?

Différentes sociétés françaises et internationales fabriquent et distribuent des inocula* microbiens. Ces derniers sont homologués et, selon les recommandations du fabricant, peuvent être introduits sans contrainte dans les sols sous différentes formes (liquides, substrats, granules, poudres...). L'inoculum mycorrhizien* peut être introduit au moment du semis selon les recommandations du producteur. Actuellement, le choix des espèces mycorrhiziennes sur le marché est très limité ; seules quelques espèces endomycorhiziennes* sont produites à l'échelle industrielle et quasiment aucune espèce ectomycorhizienne* issue de sols pollués n'est produite à l'échelle industrielle. Seules les espèces fongiques d'intérêt agro-alimentaire (ex. : truffe, lactaire) ou pour la foresterie sont produites et exploitées en pépinière.

Est-ce que la phyto et rhizodégradation est applicable sur tous types de sols ?

L'efficacité de cette technique dépend des caractéristiques pédologiques et agronomiques du sol, qui doivent permettre l'implantation et le développement des plantes et l'activité microbienne. Mais un facteur essentiel est l'accessibilité du ou des polluants (plus la pollution est ancienne, moins elle est dégradable).

Est-ce que l'hétérogénéité des concentrations des polluants dans les sols peut poser un problème ?

Si la pollution du sol à traiter est très hétérogène, il peut être recommandé de l'homogénéiser avant traitement (excavation, ...).

Peut-on utiliser des plantes pour le traitement des multi-pollutions (ETM plus polluants organiques) ?

Il n'y a actuellement pas de plantes herbacées décrites pour leur efficacité vis-à-vis des deux types de polluants, mais certains arbres (saules et peupliers...) sont aussi utilisés pour la phytoextraction. Des plantations successives ou des mélanges de plantes peuvent aussi être envisagés.



Références

Chapitre 1 : Présentation générale

Arshad M, Silvestre J, Pinelli E, Kallerhoff J, Kaemmerer M, Tarigo A, Shahid A, Guiesse M, Pradere P, Dumat C, *A field study of lead phytoextraction by various scented Pelargonium cultivars*, Chemosphere 71: 2187-2192, 2008

Bert V, Lors Ch, Ponge JF, Caron L, Biaz a, Dazy M, Masfaraud JF, *Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: a field study focusing on plants, springtails and bacteria*, Environ Pollut, 2012

Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thi Thanh Thuy H, Vandecasteele B, *Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites*, Environ Sci Pollut Res 16: 745-764, 2009

Bes C, Mench M, Aulen M, Gaste H, Taberly J, *Spatial variation of plant communities and shoot Cu concentrations of plant species at a timber treatment site*, Plant Soil, DOI: 10.1007/s11104-009-0198-4, 2010

- Bidard G, Garçon G, Pruvot C, Dewaele D, Cazier F, Douay F, Shirali P, *Behavior of Trifolium repens and Lolium perenne growing in a heavy metal contaminated field: plant metal concentration and phytotoxicity*, Environ Pollut 147: 546-553, 2007
- Boisson J, Mench M, Sappin-Didier V, Solda P, Vangronsveld J, *Short-term in situ immobilization of Cd and Ni by beringite and steel shots application to long-term sludged plots*, Agronomie 18: 347-359, 1998
- Ernst&Young, *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France, synthèse des données 2010*, www.ademe.fr (à venir), Fin 2012
- Ernst&Young, *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France, synthèse des données 2008*, <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&id=77231&ref=14231&nocache=yes&p1=111>, 2010
- Kolbas A, Mench M, Herzig R, Nehnevajova E, *Potential use of sunflower for the phytoremediation of Cu contaminated soils at a wood treatment site. In: Erdei L (ed.) Uptake, sequestration and detoxification – an integrated approach*, COST Action 859, Szeged, Hungary, pp. 56-57, 2009
- Lopareva-Pohu A, Verdin A, Garçon G, Sahraoui A L-H, Pourrut B, Debiante D, Waterlot C, Laruelle F, Bidar G, Douay F, Shirali P, *Influence of fly ash aided phytostabilisation of Pb, Cd and Zn highly contaminated soils on Lolium perenne and Trifolium repens metal transfer and physiological stress*, Environ Pollut 159: 1721-1729, 2011
- Lopareva-Pohu A, Pourrut B, Waterlot C, Garçon G, Bidar G, Pruvot C, Shirali P, Douay F, *Assessment of fly ash-aided phytostabilisation of highly contaminated soils after 8-year field trial Part 1. Influence on soil parameters and metal extractability*, Sci Total Environ 409: 647-654, 2011
- Mench M, Bes CM, Jaunatre R, Hego E, Kolbas A, Gasté H, Aulen M, Taberly J, Guinberteau J, Kechit F, San Martin-Garcia S, Bedon F, Chaumeil P, Lalanne C, Plomion C, Negim O, Gawronski S, Gawronska H, Kucharski R, Sas-Nowosielska A, Van der Lelie D, Vangronsveld J, Herzig R, Nehnevajova E, Palagi PM, Barré A, Claverol S, Dupuy JW, Bonneau M, Kumpiene J, Touzard B, Laporte-cru J, *Phytoremédiation d'un site et de sols contaminés par des produits de traitement du bois – rapport final*, Rapport final convention ADEME 0572C0018, INRA n°22000033, UMR BIOGECO INRA 1202, Talence, 461p, 2010
- Mench M, Lepp, Bert V, Schwitzguébel JP, Gawronski SW, Schröder P, Vangronsveld, *Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859 J*, J Soils Sediments 10: 1039-1070, 2010
- Mench M, Schwitzguébel JP, Schröder P, Bert V, Gawronski S, Gupta S, *Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety*, Environ Sci Pollut Res 16(7): 876-900, 2009

- Mench M, Schwitzguébel JP, Schröder P, Bert V, Gawronski S, Gupta S, *Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety*, Environ Sci Pollut Res 16(7): 876-900, 2009
- Mench M, Vangronsveld J, Lepp N, Ruttens A, Bleeker P, Geebelen W, *Use of soil amendments to attenuate trace element exposure: sustainability, side effects, and failures*. In: Hamon R, McLaughlin M, Lombi E (eds.) *Natural attenuation of trace element availability in soils*, SETAC Press, Pensacola, pp. 197-228, 2007
- Ouvrard *et al.*, *In situ Assessment of phytotechnologies for multicontaminated soil management*, Int J Phytoremediat 13: 245-263, 2011
- Schwartz C, Echevarria G, Morel JL, *Phytoextraction of cadmium with *Thlaspi caerulescens**, Plant Soil 249: 27-35, 2003
- Vangronsveld, J, Herzig, R, Weyens, N, Boulet, J, Adriaensen, K, Ruttens, A, Thewys, T, Vassilev, A, Meers, E, Nehnevajova, E, van der Lelie D, Mench M, *Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field*, Environ Sci Pollut Res 16: 765-794, 2009

Chapitre 2 : Applicabilité

- ADEME, *Traitabilité des sols pollués. Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances*, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=10143>, 2009
- ADEME, *Outils biologiques d'évaluation des risques pour les écosystèmes (éRé)*, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=10143>, 2012
- Boisson J, Cuny F, Guérin V, Battaglia-Bruner F, Joulian C, Bataillard P, Burnol A, Bouchardon JL, Faure O, Charissou AM, Algros E, Carrey A, Colpaert J, *PHYTOPERF : évaluation des performances de la phytostabilisation sur un grand site - rapport final -*, www.ademe.fr (à venir), Oct 2012
- Ecollectivités, *Un projet urbain et de dépollution 100% biologique à Besançon*, Ecollectivités, n°8 avril/mai, pp. 31, 2009
- Ernst&Young, *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France, synthèse des données 2010*, www.ademe.fr (à venir), Fin 2012
- Ernst&Young, *Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines pollués en France, synthèse des données 2008*, <http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?sort=-1&cid=96&m=3&cid=77231&ref=14231&nocache=yes&p1=111>, 2010

Le Parisien, édition de l'Oise matin, *Des plantes pour dépolluer les friches industrielles [du bassin creillois]*, Le Parisien, édition de l'Oise matin du 6 octobre 2010, 2010

Onwubuya K, Cundy A, puchenreiter M, Kumpiene J, Bone B, Greaves J, Teasdale P, Mench M, Tlustos P, Mikhlovsky S, Waite S, Friesl W, Marschner B, Muller I, *Developing decision support tools for the selection of "gentle" remediation approaches*, Sci Total Environ 407: 6132-6142, 2009

Ouvrard *et al.*, *In situ Assessment of phytotechnologies for multicontaminated soil management*, Int J Phytoremediat 13: 245-263, 2011

Thewys T, Witters A, Meers E, Vangronsveld J, *Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize Part II: Economics of anaerobic digestion of metal contaminated maize in Belgium*, Int J Phytoremediat 12: 663-679, 2010

Thewys T, Witters N, Van Slycken S, Ruttens A, Meers E, Tack FMG, Vangronsveld J, *Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize Part I: Effect on the farmer's income*, Int J Phytoremediat 12: 650-662, 2010

Chapitre 3 : Phytostabilisation

ADEME, *Traitabilité des sols pollués. Guide méthodologique pour la sélection des techniques et l'évaluation de leurs performances*, <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=10143>, 2009

Bert V, Lors Ch, Ponge JF, Caron L, Biaz a, Dazy M, Masfaraud JF, *Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site: a field study focusing on plants, springtails and bacteria*, Environ Pollut 169: 1-11, 2012

Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thi Thanh Thuy H, Vandecasteele B, *Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites*, Environ Sci Pollut Res 16: 745-764, 2009

Boisson J, Cuny F, Guérin V, Battaglia-Bruner F, Joulian C, Bataillard P, Burnol A, Bouchardon JL, Faure O, Charissou AM, Algros E, Carrey A, Colpaert J, *PHYTOPERF : évaluation des performances de la phytostabilisation sur un grand site – rapport final*, www.ademe.fr (à venir), Oct 2012

Bolan N, Naidu R, Choppala G, Park J, Mora ML, Budianta D, Panneerselvam, *Solute interactions in soils in relation to the bioavailability and environmental remediation of heavy metals and metalloids*, Pedologist 1-18, 2010

Bourdon, *Etude de la faisabilité technico-économique de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation de biomasse*, INERIS, pp. 69, 2011

Cheng SF and Hseu ZY, *In situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils*, Water Air Soil Pollut 140: 73-84, 2002

- Dazy M, Jung V, Férard JF, Masfaraud JF, *Ecological recovery of vegetation at a former coke-factory industrial wasteland: role of plant antioxidant enzymes and possible implications in site restoration*, Chemosphere 74: 57-63, 2008
- Gimbert F, Mench M, Coeurdassier M, Badot MP, de Vaufleury A, *Kinetic and dynamic aspects of soil-plant-snail transfer of cadmium in the field*, Environ Pollut 152: 736-745, 2008
- Javaid A, *Importance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils*, Biomangement of Metal-Contaminated Soils, 2011
- Khan MS, Zaidi A, Goel R, Mussarat J, Springer Publishers. pp. 125-141
- Kidd P, Barcelo J, Pilar Bernal M, Navari-Izzo F, Poschenrieder C, Shilev S, Clemente R, Monterroso C, *Trace element behavior at the root-soil interface: implications in phytoremediation*, Environ Exp Botany 67: 243-259, 2009
- Knox AS, Seaman JC, Mench M, Vangronsveld J, *Remediation of metal- and radionuclides-contaminated soils by in situ stabilization techniques*, in: Iskandar, I.K. (Ed.), *Environmental Restoration of Metal-contaminated Soils*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 21-60, 2001
- Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C, *Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – a review*, Waste Manage 28: 215-225, 2008
- Kumpiene J, Mench M, Bes I, Fitts J, *Assessment of aided phytostabilization of copper-contaminated soil by X-ray absorption spectroscopy and chemical extractions*, Environ Pollut 159: 1536-1542, 2011
- Madejon P and Lepp N, *Arsenic in soils and plants of woodland regenerated on an arsenic-contaminated substrate: a sustainable natural remediation?*, Sci Total Environ 379: 256-262, 2007
- Mench M, Lepp, Bert V, Schwitzguébel JP, Gawronski SW, Schröder P, Vangronsveld, *Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859 J*, J Soils Sediments 10: 1039-1070, 2010
- Mench M, Schwitzguébel JP, Schröder P, Bert V, Gawronski S, Gupta S, *Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety*, Environ Sci Pollut Res 16(7): 876-900, 2009
- Nijskens P, *Guide pratique de la culture de miscanthus*, Valbiom asbl, 2007
- Nolan A, Zhang H, McLaughlin M, *Prediction of zinc, cadmium, lead and copper availability to wheat in contaminated soils using chemical speciation, diffusive gradients in thin films, extraction and isotopic dilution techniques*, J Environ Qual 34: 496-507, 2005
- Regvar M, Vogel-Mikus K, Kugonic N, Turk B, Batic F, *Vegetational and mycorrhizal successions at a metal polluted site: indications for the direction of phytostabilisation?*, Environ Pollut 144: 976-984, 2006

- Remon E, Bouchardon JL, Cornier B, Guy B, Leclerc JC, Faure O, *Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: implications in risk assessment and site restoration*, Environ Pollut 137: 316-323, 2005
- Robinet D, *Les utilisations du miscanthus*, Valbiom asbl, 2009
- Robinet D, *Calcul de la marge brute de la culture de miscanthus*, Valbiom asbl, 2009
- Roy S, Khasa, DP; Greer CW, *Combining alders, frankiae, and mycorrhizae for the revegetation and remediation of contaminated ecosystems*, Canadian J Botany 85 (3): 237-251, 2007
- Ruttens A, Mench M, Colpaert JV, Boisson J, Carleer R, Vangronsveld J, *Phytostabilization of a metal contaminated sandy soil. I: influence of compost and/or inorganic metal immobilizing soil amendments on phytotoxicity and plant availability of metals*, Environ Pollut 144: 524-532, 2006
- Schnitzler A, *Miscanthus : l'homme cultive-t-il un nouvel envahisseur ?*, Université de Metz/ Agence de l'eau Rhin Meuse pp. 41, 2011
- Tessier, A., Campbell, P.G.C., Bisson, M., *Sequential extraction for the speciation of particulate trace metals*, Anal. Chem. 51: 844-851, 1979
- Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, Thewys T, Vassilev A, Meers E, Nehnevajova E, van der Lelie D, Mench M, *Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field*, Environ Sci Pollut Res 16: 765-794, 2009
- Wenzel WW, *Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils*, Plant Soil 321: 385-408, 2009

Chapitre 4 : Phytoextraction

- Araujo J, Nascimento C, *Phytoextraction of lead from soil from a battery recycling site: the use of citric acid and NTA*, Water Air Soil Pollut 211: 113-120, 2010
- Bani A, Echevarria G, Sulçe S, Morel JL, Mullai A, *In-situ phytoextraction of Ni by a native population of Alyssum murale on an ultramafic site (Albania)*, Plant Soil 293: 79-89, 2007
- Barbaroux B, Mercier G, BLAIS J-F, Morel JL, Simonnot M-O, *A new method for obtaining nickel metal from the hyperaccumulator plant Alyssum murale*, Separation and Purification Technology 83: 57-65, 2011
- Barbaroux R, Meunier N, Mercier G, Taillard V, Morel JL, Simonnot MO, BLAIS JF, *Chemical leaching of nickel from the seeds of the metal hyperaccumulator plant Alyssum murale*, Hydrometallurgy 100: 10-14, 2009
- Barbaroux R, Plasari E, Mercier G, Simonnot MO, Morel JL, Blais JF, *A new process for nickel ammonium disulfate production from ash of the hyperaccumulating plant Alyssum murale*, The Science of the Total Environment 423: 111-119, 2012

- Barona A, Aranguiz I, Elias A, *Metal associations in soils before and after EDTA extractive decontamination: implications for the effectiveness of further clean-up procedures*, Environ Pollut 113: 79-85, 2001
- Baum Ch, Hrynkiwicz K, Leinweber P, Meibner R, *Heavy-metal mobilization and uptake by mycorrhizal and nonmycorrhizal willows (Salix x dasyclados)*, J Plant Nutr Soil Sci 169: 516-522, 2006
- Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thi Thanh Thuy H, Vandecasteele B, *Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites*, Environ Sci Pollut Res 16: 745-764, 2009
- Bourdon, *Etude de la faisabilité technico-économique de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation de biomasse*, INERIS, pp. 69, 2011
- Carrier M, Loppinet-Serani A, Absalon Ch, Marias F, Aymonier C, Mench M, *Conversion of fern (Pteris vittata L) biomass from a phytoremediation trial in sub-and supercritical water conditions*, Biomass Bioenerg 35: 872-883, 2011
- Chaney R, Angle J, Broadhurst C, Peters C, Tappero R, Sparks D, *Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies*, J Environ Qual 36: 1429-1444, 2007
- Evangelou MWH, Ebel M, Schaeffer A, *Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents*, Chemosphere 68: 989-1003, 2007
- Grison Cl, Escarré J, *Quand la dépollution deviant productive Valorisation des métaux lourds*, Info Chimie Magazine 495: 34-36, 2009
- Herzig R, Nehnevajova E, Bourigault C, Schwitzguébel JP, *Fast reduction of soluble zinc on a metal contaminated site using selected tobacco plants and appropriate fertilization techniques - COST Action 859 Management Committee Meeting and WG2 & 4 meeting. Fate of pollutants in the plant rhizosphere system: fundamental aspects and their significance for field applications – prospects and research needs*, 30 May-1 June 2007, Vilnius (Lithuania). Proceedings, pp. 67-8, 2007
- Herzig R, Ricci A, Nehnevajova E, Schwitzguébel JP, *Assessing of the phytoextraction efficiency for soluble zinc and other heavy metals from a contaminated top soil using biotechnologically improved tobacco and sunflower mutants and appropriate fertilization techniques - COST Action 859 Management Committee Meeting and WG4 meeting. Phytotechnologies in practice – biomass production, agricultural methods, legacy, legal and economic aspects*, INERIS 15-17 October 2008, Verneuil en Halatte (France). Proceedings, pp. 20-2, 2007
- INERIS, *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : EDTA et ses sels*, 49p, <http://rsde.ineris.fr/>, 2011
- Javaid A, *Importance of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soils*, Biomangement of Metal-Contaminated Soils, 2011

- Keller C, Ludwig Ch, Davoli F, wochele J, *Thermal treatment of metal-enriched biomass produced from heavy metal phytoextraction*, Environ Sci Tech 39: 3359-3367, 2005
- Kidd P, Barcelo J, Pilar Bernal M, Navari-Izzo F, Poschenrieder C, Shilev S, Clemente R, Monterroso C, *Trace element behavior at the root-soil interface: implications in phytoremediation*, Environ Exp Botany 67: 243-259, 2009
- Lebeau T, Braud A, Jézéquel K, *Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: a review*, Environ Pollut 153: 497-522, 2008
- Li YM, Chaney R, Brewer E, Roseberg R, Scott Angle J, Baker A, Reeves R, Nelkin J, *Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations*, Plant Soil 249: 107-115, 2003
- Luo Ch, Shen Z, Li X, *Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS*, Chemosphere 59: 1-11, 2005
- McGrath S, Sidoli C, Baker A, Reeves R, *The potential for the use of metal-accumulating plants for the in situ decontamination of metal-polluted soils*, In: Eijsackers H, Hamers T (eds.) *Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection*, Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 673-676, 1993
- McGrath SP, Lombi E, Gray CW, Caille N, Dunham SJ, Zhao FJ, *Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators Thlaspi caerulescens and Arabidopsis halleri*, Environ Pollut 141: 115-125, 2006
- Mench M, Lepp, Bert V, Schwitzguébel JP, Gawronski SW, Schröder P, Vangronsveld, *Successes and limitations of phytotechnologies at field scale: outcomes, assessment and outlook from COST Action 859 J*, J Soils Sediments 10: 1039-1070, 2010
- Mench M, Schwitzguébel JP, Schröder P, Bert V, Gawronski S, Gupta S, *Assessment of successful experiments and limitations of phytotechnologies: Outcomes from COST Action 859 on contaminant uptake, detoxification and sequestration, and consequences for food safety*, Environ Sci Pollut Res 16(7): 876-900, 2009
- Nehnevajova E, Herzig R, Bourigault C, Bangerter S, Schwitzguébel JP, *Stability of enhanced yield and metal uptake by sunflower mutants for improved phytoremediation*, Int J Phytoremediat 11(4): 329-346, 2009
- Nehnevajova E, Herzig R, Federer G, Erismann KH, Schwitzguébel JP, *Screening of sunflower cultivars for metal phytoextraction in a contaminated field prior to mutagenesis*, Int J Phytoremediat 7: 337-349, 2005
- Rajkumar M, ae N, Freitas H, *Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction*, Chemosphere 77: 153-160, 2009
- Robinson B, Green S, Mills T, et al., *Phytoremediation: using plants as biopumps to improve degraded environments*, Australian Journal of Soil research 41: 599-611, 2003

- Robinson B, Schulin R, Nowack B, Roulier S, Menon M, Clothier B, Green S, Mills T, *Phytoremediation for the management of metal flux in contaminated sites*, For Snow Landscape Research 80: 221-234, 2006
- Robinson BH, Leblanc M, Petit D, Brooks RR, Kirkman JH, Gregg PEH, *The potential of Thlaspi caerulescens for phytoremediation of contaminated soils*, Plant Soil 203: 47-56, 1998
- Römken P, Bouwman L, Japenga J, Draaisma C, *Potentials and drawbacks of chelate-enhanced phytoremediation of soils*, Environ Pollut 116: 109-121, 2002
- Ruttens A, Boulet J, Weyens N *et al.*, *Short rotation coppice culture of willows and poplars as energy crops on metal contaminated agricultural soils*, Int J Phytoremediat 13: 194-207, 2011
- Syc M, Pohorely M, Kamenikova P, Habart J, Svoboda K, Puncocar M, *Willow trees from heavy metals phytoextraction as energy crops*, Biomass Bioenergy 37: 106-113, 2012
- Thewys T, Kuppens T, *Economics of willow pyrolysis after phytoextraction*, Int J Phytoremediat 10: 561-583, 2008
- Thewys T, Witters A, Meers E, Vangronsveld J, *Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize Part II: Economics of anaerobic digestion of metal contaminated maize in Belgium*, Int J Phytoremediat 12: 663-679, 2010
- Thewys T, Witters N, Van Slycken S, Ruttens A, Meers E, Tack FMG, Vangronsveld J, *Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize Part I: Effect on the farmer's income*, Int J Phytoremediat 12: 650-662, 2010
- Van Ginneken L, Meers E, Guisson R, Ruttens A, Elst K, Tack PMG, Vangronsveld J, Diels L, Dejonghe W, *Phytoremediation for heavy metal-contaminated soils combined with bioenergy production*, J Environ Eng Landsc 15: 227-236, 2007
- Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, Boulet J, Adriaensen K, Ruttens A, Thewys T, Vassilev A, Meers E, Nehnevajova E, van der Lelie D, Mench M, *Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field*, Environ Sci Pollut Res 16: 765-794, 2009
- Verbruggen N, Hermans Ch, Schat H, *Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants*, New Phytologist 181: 759-776, 2009
- Wenzel WW, *Rhizosphere processes and management in plant-assisted bioremediation (phytoremediation) of soils*, Plant Soil 321: 385-408, 2009
- Wu QT, Deng JC, Long XX, Morel JL, Schwartz C, *Selection of appropriate organic additives for enhancing Zn and Cd phytoextraction by hyperaccumulators*, J Environ Sci – China, 18: 1113-1118, 2006

Zhao FJ, Lombi E, McGrath SP, *Assessing the potential for zinc and cadmium phytoremediation with the hyperaccumulator Thlaspi caerulescens*, Plant Soil 249: 37-43, 2003

Chapitre 5 : Phyto et rhizodegradation

ADEME, *Ecotoxicité des sols et des déchets: Résultats des tests biologiques*, ADEME Editions, Angers, France, 96 pp, 2002

Bert V, Seuntjens P, Dejonghe W, Lacherez S, Thi Thanh Thuy H, Vandecasteele B, *Phytoremediation as a management option for contaminated sediments in tidal marshes, flood control areas and dredged sediment landfill sites*, Environ Sci Pollut Res 16: 745-764, 2009

Bertrand JC, Doumenq P, Guyoneaud R, Marrot B, Martin-Laurent F, Matheron R, Moulin P, Soulas G, *Ecologie microbienne appliquée et dépollution – Les microorganismes majeurs de l'élimination des polluants qui affectent l'environnement. Dans Ecologie Microbienne-Microbiologie des milieux naturels et anthropisés*, Bertrand JC, Caumette P, Lebaron P, Matheron P, Normand P (eds.), Pupa, pp. 705-795, 2011

Bonnard M, *Relations « biodisponibilité – génotoxicité – écotoxicité » des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols de friches industrielles*, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Verlain – Metz, 2010

Glick BR, *Using soil bacteria to facilitate phytoremediation*, Biotechnol Adv 28: 367-374, 2010

Green C, Hoffnagle A, *Phytoremediation Field Studies Database for Chlorinated Solvents, Pesticides, Explosives, and Metals*, US Environmental Protection Agency, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Washington, DC, 2004

Jauzein M, Jourdain MJ, Bispo A & Savanne D, *Ecotoxicité des sols et des déchets : extraction des polluants*, ADEME Editions, Paris, France, 138 pp, 1999

Leyval C, Joner EJ, del Val C, Haselwandter K, *Potential of arbuscular fungi for bioremediation, dans Mycorrhizal technology in Agriculture*, Gianinazzi, S., Schüepp, H., Barea, J.M., Hselwandter (eds.) Birkhäuser Verlag Switzerland, 175-186, 2002

Macek T, Macková M, Kášb J, *Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation*, Biotechnol Adv 18: 23-34, 2000

McGuinness M, Dowlin D, *Plant-associated Bacterial Degradation of toxic organic compounds in soil*, Int. J., Environ. Res., Public Health 6: 2226-2247, 2009

Newman LA et Reynolds CM, *Phytodegradation of organic compounds*, Curr Opin Biotechnol 15 (3): 225-230, 2004

Pilon-Smits E, *Phytoremediation*, Annu Rev Plant Biol 56: 15-39, 2005

- Reid BJ, Stokes JD, Jones KC et Semple KT, *Nonexhaustive cyclodextrin-based extraction technique for the evaluation of PAH bioavailability*, Environ Sci Technol, 34: 3174-3179, 2000
- Schwitzguébel JP, Comino E, Plata N, Khalvati M, *Is phytoremediation a sustainable and reliable approach to clean-up contaminated water and soil in Alpine areas*, Environ Sci Pollut Res 18: 842-856, 2011
- Semple KT, Morris WJ, Paton GI, *Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis*, Eur J Soil Sci 54: 809-818, 2003
- Surarla S, Medina F, McCutcheon SC, *Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination*, Ecol Eng 18: 647-658, 2002
- Teng Y., Shen Y., Luo Y., Sun Y., Sun X., Sun M., Fu, D., Li Z., Chritie P., *Influence of Rhizobium meliloti on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons by alfalfa in an aged contaminated soil*, J hazard mat 186: 1271-1276, 2011
- Wessels Perelo L, *Review: In situ and bioremediation of organic pollutants in aquatic sediments*, J hazard mat 177: 81-89, 2010
- Weyens N, Taghavi S, Barac T, van der Lelie D, Boulet J, Artois T, Carleer R, Vangronsveld J, *Bacteria associated with oak and ash on a TCE-contaminated site: characterization of isolates with potential to avoid evapotranspiration*, Environ Sci Pollut Res 16: 830-43, 2009
- Weyens N, van der Lelie D, Taghavi S, Vangronsveld J, *Phytoremediation: plant-endophyte partnerships take the challenge*, Curr Opin Biotechnol 20: 248-254, 2009

Vj k'ri ci g'kpvkqpcmf 'igh'dic pm



Glossaire

Actinomycètes : Groupe de bactéries Gram-positives ; filamenteuses, elles participent à la vie du sol, notamment à la décomposition des matières organiques.

Biodisponibilité : Propriété d'une substance à atteindre les membranes cellulaires des organismes vivants ; elle n'est mesurable que relativement à une espèce vivante ou à un groupe d'espèces.

Bioremédiation : Remédiation des sols pollués grâce aux microorganismes (bactéries ou champignons saprotrophes*).

Capacité d'Échange Cationique (CEC) : Ce paramètre est la quantité de cations que le sol étudié peut retenir sur son complexe adsorbant ; plus le sol est riche en argile et en matière organique, plus sa CEC est importante.

Champignon saprotrophe : Champignon qui se nourrit de matière en décomposition.

Cultivar : Variété de plante obtenue en culture, généralement par sélection, pour ses caractéristiques « réputées uniques ».

Endophytique ou endophyte : Organismes qui accomplissent tout ou partie de leur cycle de vie à l'intérieur d'une plante, de manière symbiotique.

Facteur de bioconcentration : Ratio entre la concentration du composé étudié dans le milieu et la concentration de l'organisme ; il permet d'établir la bioaccumulation.

Facteur de translocation : Fraction déposée sur la masse foliaire du végétal qui parvient à la partie consommée du végétal (grain, fruit, racine, tubercule).

Inoculum : Amendement contenant des microorganismes (bactéries, champignons saprotrophes* ou mycorhiziens*), destiné à être introduit au sein d'un milieu favorable à leur multiplication, en l'occurrence dans le sol pollué dans le cas de la phytoremédiation.

Mycorhize : Association symbiotique entre un champignon dit « mycorhizien » et les racines d'une plante. Le champignon, en échange du carbone fourni par la plante, améliore la nutrition hydrique et minérale de la plante. Les deux symbioses mycorhiziennes les plus connues sont les associations internes (endomycorhizes) et externes (ectomycorhizes).

Nématode : Autrement appelé vers ronds, les nématodes sont des vers non segmentés, qui peuvent vivre de façon libre ou parasitaire ; ils peuvent notamment être des parasites de plantes.

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) : Bactéries du sol qui favorisent le développement des plantes soit de façon directe (stimulation de la photosynthèse, de la nutrition, de la production d'hormones...) ou de façon indirecte en améliorant la résistance des plantes aux agents phytopathogènes.

Poacée : Famille botanique autrefois appelée graminée, comportant les « herbes » ou encore les « bambous ».

Rhizosphérique ou rhizosphère : Région du sol directement formée et influencée par les racines et les microorganismes associés.

Services écosystémiques : Ce sont les bénéfices que les hommes tirent des écosystèmes ; ils sont de 4 types : de support, d'approvisionnement, de régulation et culturels et sociaux.

Sidérophore : Chélateur de fer synthétisé et sécrété par des microorganismes.

Sol anthropisé : Sol transformé sous l'action de l'homme, et qui s'éloigne de la naturalité.

Surfactants ou tensioactifs : Molécules amphiphiles (qui possèdent à la fois une partie hydrophile et une partie hydrophobe) capables de réduire les tensions inter-faciales entre deux phases de polarités différentes ; principalement utilisées comme agent émulsifiant ou dispersant.

Ubiquiste : Dit d'une espèce susceptible d'être observée dans de très nombreux habitats.